공학석사 학위논문

기포를 동반한 유동장에서의 해수 동결거동에 관한 연구

A Study on Sea Water Freezing Behavior in a Flow Field with Bubbly Flow

지도교수 오 철

2001년 2월

한국해양대학교 대학원

기 관 공 학 과

박 대 식

本論文을朴大植의工學碩士學位論文으로認准함

主審　工學博士　金 明 煥　印

副審　工學博士　李 英 浩　印

副審　工學博士　吳　　喆　印

2000年　12月　22日

韓國海洋大學校　大 學 院

機 關 工 學 科　朴 大 植

목　　차

Abstract

One of the most essential things to maintain our lives is water. Water consumption is rapidly increasing due to the exclusive overpopulation, industrial development and improvement of people's living standards. However, only 1% of water source is available for human being, so the ever-increasing scarcity of water is getting serious as time goes by.

Korea also will be no exception of this tendency and many researches have often proven how urgent Korea is water deficiency problem. In order to reduce this problem, we try to make the most water through building multi-functional dams, rainmaking and developing desalination system. Among those, desalination system is expected to be the most effective method because of its availability of seawater. It'll enable us to get water steady and readily. When we select particular kind of desalination system devices, that decision is mostly influenced by fresh water produce cost. In order words, its efficiency depends on whether we can achieve possible energy source easily or not.

As environmentally friendly means, many people are encouraged

to use LNG (Liquefied Natural Gas) in Korea and many countries of the world. Amount of LNG consumption is currently heading higher. In general, LNG which is stored below -162℃ in super-liquid tank requires certain energy to gasify because it changed into the gaseous state with high pressure wasted cold energy when it is sent to each part in need. LNG loses lots of cold energy (850kJ/kg) during this process of absorbing heat.

To take advantage of this wasted cold energy, we are developing the systems such as producing the frozen food processing, dry ice, liquefied hydrogen, liquefied nitrogen and seawater freezing desalination. Therefore we'll mainly focus on the development of a seawater freezing desalination system and design technique using wasted cold energy necessary to freezing behavior of seawater. This study is intended to achieve qualitative and quantitative fundamental data with respect to it.

The device mainly consists of test section(transparent acryl rectangular duct), a brine loop ; maintaining the temperature of cooled parts, PIV(Particle Image Velocimetry) system ; visualizing the flow in freezing part, etc.

After considering mean concentration of seawater measuring water and refined salt with digital balance and salinity meter, the operating fluid can function as 3.5wt% NaCl aqueous solution.

We operate brine loop using ethylene glycol 40% aqueous solution within the temperature of -21.12℃(eutectic point of seawater). Visualizing section using nylon12 tracer measures PIV with Argon-ion laser. After injecting -0.5℃ air into the test-section accompanied by flow field, investigated the flow appearance in around cooled parts by using the PIV system.

The experiments were carried out for a variety of parameter, such as sea water velocity, air-bubble flow rate, and cooled part temperature. The shape of freezing layer, freezing rate and salinity of frozen layer were observed and measured. And the flow patterns around cooled parts were visualized using the PIV to analyze the relationship between the flow structure and the freezing characteristics. It was found that the experimental parameters gave a great influence on the freezing rate and the salinity of the frozen layer.

사 용 기 호

Alphabet

A_c	: 흐름에 대한 단면적	[㎡]
C	: 염분농도	[wt%]
D_h	: 수력직경($= 4A_c/P$)	[m]
H_o	: 초기용액의 높이	[m]
P	: 접수주변	[m]
Q	: 전열량	[W]
q	: 열유속	[W/㎡]
Q_{air}	: 공기 분사량	[ℓ/min]
r	: 반지름	[m]
Re	: Reynolds수	[-]
R_f	: 무차원 동결량	[-]
T_f	: 농도에 따른 평형 동결온도	[℃]
T_{fs}	: 동결층 표면온도	[℃]
T_i	: 수용액의 초기온도	[℃]

T_o : **물의 동결온도** [℃]

T_w : **냉각면 온도** [℃]

t : **시간** [hr]

U_i : **해수의 유속** [m/s]

V_f : **단위면적당 동결량** [m^3/m^2]

W_{air} : **분사공기의 질량유량** [kg/s]

W_l : **해수의 질량유량** [kg/s]

X : **무차원 공기유량** [-]

Greeks symbol

δ : **원통의 두께** [m]

ν : **수용액의 농도에 따른 동점성계수** [㎡/s]

ρ : **밀도** [kg/㎥]

θ_w : **무차원 냉각면 온도** [-]

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

물은 수소와 산소가 화학적으로 결합된 액체(H_2O)로서 동·식물 구성체의 70% 80%가 물로 구성되어 있으며 생물의 생존에 없어서는 안 되는 가장 필수적인 물질이다. 인체에 물이 부족하면 신진대사가 불가하고 체내에 독소가 누적되어 사망에 이르게 된다. 따라서, 인간의 생활이나 인류문명의 발달은 물을 중심으로 하여 이루어져 왔으며, 인류문명의 전개과정은 물과의 투쟁의 역사라 해도 과언이 아닐 정도로 물과 밀접한 연관을 가지고 있다.

Fig. 1.1에 나타낸 바와 같이 지구에 있는 물의 총량은 13억8천6백만 km^3정도로 추정되고 있다. 이 중 바닷물이 96.5%인 13억4천만km^3이고 나머지 2.5%정도인 3천5백여만km^3만이 담수로 존재한다. 또한 담수의 69.56%인 2천4백여만km^3은 빙산 및 빙하의 형태이고, 지하수가 30.1%인 1천여만km^3이며 나머지 0.34%인 1백여만km^3가 호수나 늪, 강, 하천 등의 지표수와 대기층에 존재한다. 하천이나 강에 있는 물의 양은 2천1백여만km^3로서 지구 총수자원의 0.006%에 불과한 매우 적은 양이지만, 수자원의 이용측면에서는 이것이 가장 귀중한 것이다.[1] 현재 인류가 사용가능한 물의 총량은 약 9천km^3로 현재 물사용량 4천3백km^3에 비해 여유가 있는 편이다. 그러나, 사용가능양의 절반 밖에 쓰고 있지 않으면

서도 인류가 물부족 위기에 직면하게 된 이유는 20세기 들어 시작된 급격한 인구의 증가와 대도시로의 인구집중, 산업발달에 따른 수질오염의 확산, 필요한 곳에 충분한 물이 있지 못한 물 자원의 지역적 편재, 그리고 인류의 생활수준 향상으로 인한 물 소비량의 증가 때문이다. 이러한 수자원의 부족은 장차 국제적인 분쟁의 원인이 될 것이다.

한편, UN이 발표한 보고서(Sustaining Water, Population and Future of Renewable Water Supplies)에 의하면 한국의 현재 1인당 물사용량은 연간 1500톤 미만으로 물압박국으로 분류되어 있으며(Table 1.1 참조), 지형적ㆍ기후적 특성으로 인해 계절적인 물의 편중에 의한 물부족이 점차 증대되어 가고 있다. 또한, 앞으로의 물 공급 전망도 좋지 못하여 우리나라의 물수요와 공급은 Table 1.2에 나타낸 바와 같이 94년 말 약 322억톤 공급에 299억톤 수요로 약 23억톤의 여유가 있었으나, 현추세대로 물소비량이 증가한다면 2011년에는 약 367억톤의 수요가 발생해 물공급량에 비해 약 20억톤 가량의 물부족이 예상된다.

이러한 물부족 현상이 점점 심해지면서 정부는 안정적인 용수 확보를 위하여 2011년까지 다목적댐 등 적정규모의 댐 건설로 신규 수자원 47억톤을 개발하여 용수예비율을 증대시킬 계획이며, 지금까지 주목하지 않았던 대체 수자원에 눈을 돌리고 있다. 지구상의 물의 97%를 차지하는 바닷물을 담수화하고 인공강우로 강제로 비를 만들거나, 중수도를 설치해 사용한 물을 다시 사용하는 등 물고갈 위기를 극복하기 위한 노력을 경주하고 있다. 이러한 인공적인 용수 생산방법 중 주류를 이루

는 것이 해수 담수화이다[2].

해수의 담수화 방법으로는 대표적으로 증발법, 막법, 냉동법, 투과 기화법 등을 들 수 있다(Table 1.3 참조). 증발법은 해수를 가열, 증발시켜 발생한 수증기를 냉각하므로서 담수를 얻는 방법으로 규모가 크고 장치의 유지 및 보수가 용이하며 순수한 담수생산이 가능한 장점이 있는 방식으로, 에너지 대량 소비형이기 때문에 산유국에 적합한 기술이다. 막법으로는 역삼투압법과 전기 투석법이있는데, 역삼투압법은 농도의 차에 의해 발생하는 삼투압효과를 이용하여 물은 통과하지만 염분은 통과하지 못하는 반투막용기를 경계로 그 한편에 해수를 넣어 가압시킴으로서 담수만을 투과 시키는 방법으로 전기소비량이 적고 염분농도가 낮은 해수의 담수화를 행하는 경우 조수비용의 저감이 가능하지만 막을 자주 교체해야 하는 단점이 있다. 전기 투석법은 양이온 교환막과 음이온 교환막 사이에 해수를 통과시킨 후 양 막의 외측에 직류전압을 걸면 막을 통하여 해수 중의 염소이온과 나트륨이온을 제거, 담수를 얻는 방법이다. 다음으로 냉동법은 해수를 동결시키면 빙의 결정격자 중에는 냉각속도에 따라 염분이 몰입되지 않고 배제됨을 이용하여 담수들 얻는 기술로서 이 방법은 성에너지 이용 측면에서 장점을 지니고 있다. 마지막으로 투과 기화법은 수증기는 통과하지만 액체의 물은 통과시키지 않는 투과 기화막 용기를 경계로 그 한쪽 편에 해수를 넣어서, 수증기만 투과 시켜서 담수를 얻는 방법으로 성에너지화가 충분히 진행되어있고, 배기열의 유효한 이용이 가능하기 때문에 태양열 등을 이용할 수 있는

지역에 적합한 기술이다.

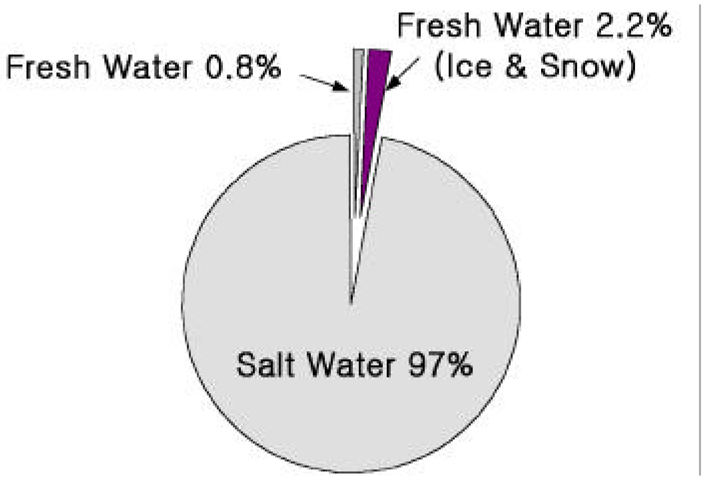
담수화 방법의 선정에 있어서 가장 중요한 요인으로 작용하는 것은 담수생산비용으로, 값싸고 쉽게 얻을 수 있는 담수화의 에너지원이 무엇인가에 따라 결정된다. 현재 우리나라의 경우는 각 임해공업단지 주변에서 저렴하게 고열원과 전력을 확보할 수 있다는 이점 때문에 증발법과 역삼투압법이 주로 사용되고 있다.

한편, 최근 우리나라는 석유에너지의 의존도를 줄이기 위해 타 연료에 비해 저가이고, 환경오염에 대한 영향이 비교적 작은 LNG(Liqufied Natural Gas:액화천연가스)에 대한 소비를 장려해 발전용, 산업용 및 가정용으로 그 수요가 급증하고 있다. 1987년 LNG 공급이 시작된 이래 IMF 경제 위기의 1998년을 제외하면 매년 지속적인 증가추세를 이루고 있다(Table 1.4 참조). LNG는 주성분이 메탄으로 1kg 당 200kcal의 냉열을 보유하고 있다. LNG는 -162℃의 초저온 액체상태로 수송, 저장되기 때문에 에너지 가치가 매우 크다.

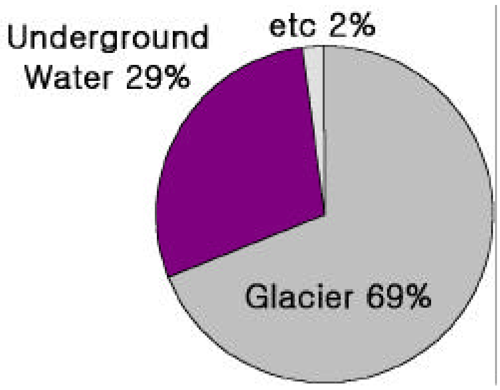
1m^{3}의 메탄을 대기압하에서 -162℃까지 냉각시키면 그 체적은 1/600으로 감소하게 된다. 이와 같은 액화과정에 의해 산지에서 수요지까지 운송되어 특수하게 제작된 저장탱크에 저장된다. 저장된 LNG는 발전소 연료 및 도시가스용으로 공급하기 위해 -162℃의 초저온 액체상태에서 0℃의 기체상태로 기화시킨후 공급 배관망에 의해 전국적으로 공급되게 된다. 이때 LNG를 기화시키기 위한 열원으로 해수를 사용하거나 천연가스 연소열에 의한 열원을 사용한다. 따라서, 세계 각국에서

는 이렇게 불필요하게 버려지는 LNG 폐냉열을 단계적이고 효과적으로 이용하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔다. LNG 냉열을 이용하는 방식으로 실용화된 산업으로서 공기액화분리, 냉열발전, 식품동결 및 저장, 초저온창고, 드라이아이스 및 액화탄산가스제조, 저온분쇄산업 등이 있으나 여전히 LNG가 저장탱크에서 각 수요지로 공급될 때 다량의 냉열이 배관망을 지나오면서 손실되고 있어 에너지 절약차원에서의 냉열 회수를 위한 적극적인 기술개발이 요구되고 있다.

본 연구는 LNG의 보유냉열을 이용한 담수화 장치의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되는 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료 확보를 위한 일련의 연구과정[3] [7]의 하나로 동결층내 염분용질의 축적을 억제하기 위한 방법을 실험적으로 고찰하였다. 따라서 본 연구는 기포류를 동반한 유동장에서의 냉각면 형상에 따른 해수동결거동의 메카니즘을 동결량과 염분농도의 측면에서 평가하였고, 각 실험인자가 열·물질이동적인 특성[8] [11]에 미치는 영향을 검토하였다.



(a) Composition of Water sources



(b) Composition of Fresh Water

Fig.1.1 Distribution of water sources in the world

Shortage	Oppression	Rich
Gibti Kuwait Malta Qatar Bahrain Babaidos Singapore Saudi Arabia UAE Jordan Yemen Israel Tunisia Kenya Algeria Somalia	Libya Morocco Egypt Oman Kyprus South Africa **Korea** Poland	Belgium, Haiti, Lebanon, Peru, Iran, Syria, England, Ethiopia, China, India, Sri Lanka, Germany, Denmark, Dominica, Nigeria, Cuba, Tanzania, Afghaistan, Italy, Figi, France, Thailand, Cuba, Uganda, Elsalvador, Pakistan, Mozambique, Trinidad, Mexico, Moricana, Japan, Senegal, Sudan, Philippines, Niger, Vietnam, Czechoslocakia, Greece, Holland, America, Swiss, Hungary, Nepal, Yugoslaivia, Congo, Angora, Estonia, Mongolia, Austria, Ireland, Cameroon, Sweden, Honduras, Bulgaria, Zaire, Malaysia, Argentina, Colombia, Brazil, Guinea, Uruguay, Panama, Surinam, Iceland

Table. 1.1 The national classification of an indivisual water consumption

YEAR	1994	2001	2011
SUPPLY	322.1	343.9	346.5
CONSUMPTION	299.0	337.4	366.5
OVERS AND SHORTS	23.1	6.5	-20.0
PREPARATION(%)	7.7	1.9	-5.5

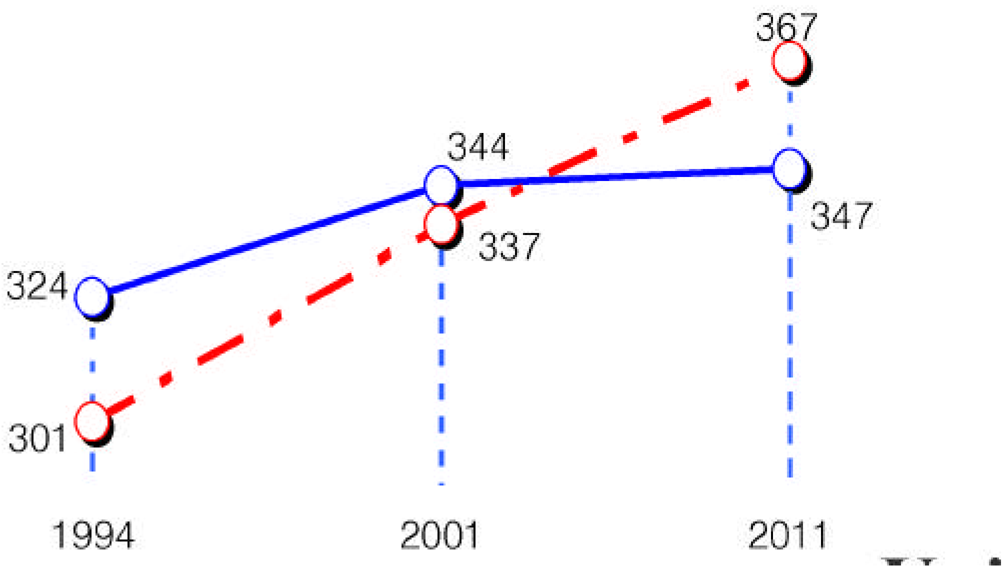


Table 1.2 Comparision of water supply and consumption

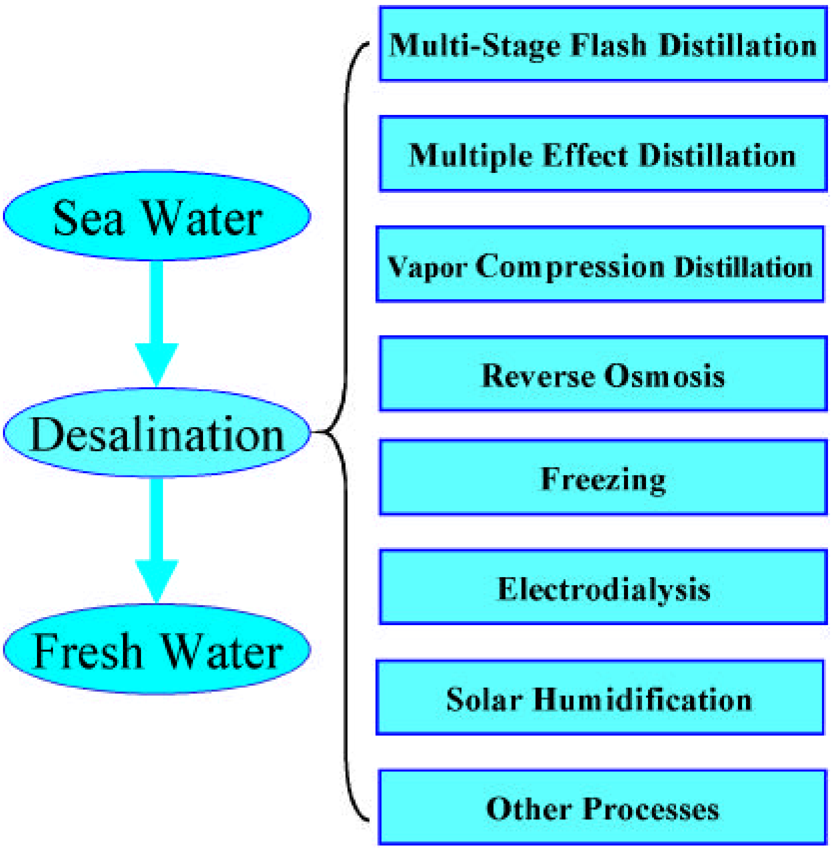


Table 1.3 Classification of sea water desalination system

YEAR	1995	1996	1997	1998	1999	2000 (expectation)
SUPPLY	7,060	9,595	11,629	10,600	13,142	15,044
CONSUMPTION	6,979	9,204	11,147	10,422	12,655	13,809

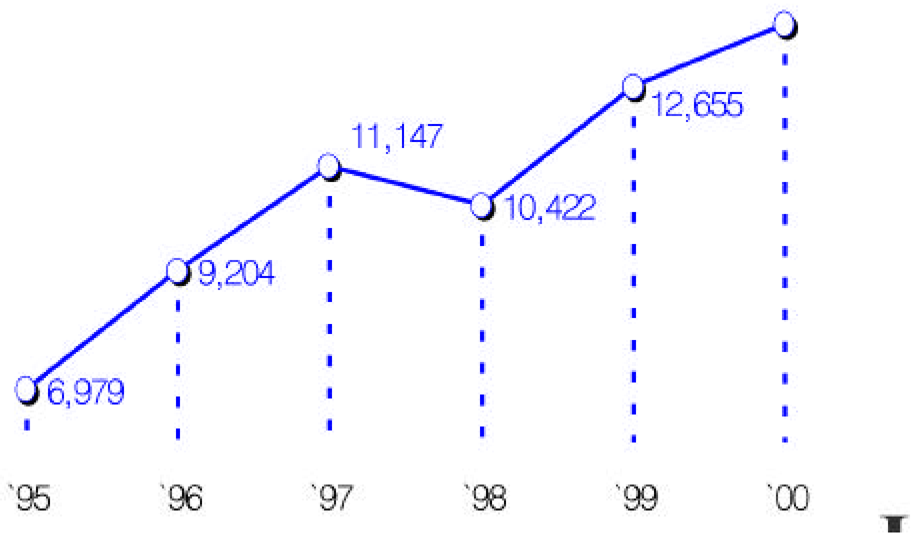


Table 1.4 The amount of LNG consumption in Korea

1.2 종래의 연구

물의 동결 및 그에 관여하는 자연대류현상에 대해서는 인간의 생활과 직접적인 관련이 많은 부분으로 오래 전부터 많은 해석적·실험적 연구가 진행되어 왔다.

빙의 열전도율은 물질내를 단위길이, 단위온도 및 단위시간당 이동하는 열량의 척도에 영향을 주는 것으로 가장 중요한 열물성이다. 그 때문에 종래부터 많은 측정결과가 보고되고 있다. Powell[12]은 1958년부터 이전의 측정결과를 정리하였으며, Landauer 와 Plumb[13]에 의해 실험실에서 인공적으로 제작된 단결정빙, 빙하의 단결정빙 및 시판 다결정빙의 열전도율의 값이 큰 차이가 없음을 발견했다.

Gilpin[14] [16]은 원관내 동결실험을 시초로 빙의 생성과정에서 나타나는 여러 가지 흥미로운 사실을 밝혀냈다. 그는 정지중인 순수액(0wt%)을 수평원관 내에서 서서히 냉각시키면 물이 응고점 이하임에도 불구하고 상변화를 일으키지 않고 과냉각된 후 관 상부부터 갑작스럽게 침상빙(Dendritic Ice)이 발생하고, 최대밀도영역에서 자연대류 역전현상이 발생한다는 사실을 발견하였고, 이러한 현상은 그 후 Cheng[17]이나 Fukusako[18]등에 의한 여러 실험들을 통해 입증되었다.

平田[19]등은 원관내 유동수의 동결에 관한 실험을 행하여 원관내에 발생하는 동결층의 영역을 레이놀즈수와 무차원 냉각온도비에 의해 정리하여, 압력손실의 실험결과에 의한 관내 동결폐색의 발생 한계식을

세웠다.

稲葉[20]등은 같은 원관내 유동수의 동결거동에 관한 연구를 행하여 동결폐색에 미치는 유속, 유입수온 및 냉각관벽온도의 효과에 대해서 실험적으로 검토하고 동결에 의해 관폐색의 한계조건 및 관폐색까지의 시간을 냉각온도비와 관레이놀즈수(Re)와의 관계로서 정량적으로 나타내었다.

한편, 흐르는 물의 동결은 유동장, 동결빙층표면의 열전달율, 동결빙층의 형상의 3가지의 상호간섭을 동반한 전열문제라 할 수 있다. Hirata[21]는 동결빙층의 형상 및 동결빙층내의 2차원 열전달 효과를 정상상태에 대하여 검토하였다.

Gilpin[22]은 흐름이 천이영역 및 난류영역에서 냉각평판상의 동결거동을 실험적으로 검토하였는데 층류경계층으로부터 난류경계층으로의 천이가 개시되는 위치에서 열전달율이 증대하고 이에따라 빙층두께가 감소됨을 발견하였으며, 난류경계층의 빙층표면에 인위적으로 흐름에 직각방향으로 2차원 정현파형상의 외란을 일으켜, 그 결과로 형성되는 빙층표면의 안정 · 불안정에 대해서 실험적 및 해석적인 검토를 실시하여 안정 · 불안정을 좌우하는 인자는 흐르는 물로부터 빙층표면으로 전달되는 열유속에 있고, 정상상태에 있어서는 냉각온도비가 제어인자로 된다는 사실을 발견하였다.

한편, 해수의 동결은 상당히 복잡한 문제로 물과 염화나트륨으로 구성된 2성분계 용액 즉 염화나트륨 수용액의 동결문제에 해당된다. 일반

적으로 염화나트륨 수용액을 동결온도 이하로 유지하면, 소금물(브라인)로부터 분리되어 빙결정(동결)이 발생한다. 동결이 진행되면, 브라인용액은 빙결정 사이에 들어있는 상태로 나누어 진다. 즉, 해수의 동결은 빙의 결정, 브라인용액, 소금의 결정 및 공기 기포가 구성요소이다. 또한, 해수의 동결에서는 순수한 물과 다르게 용질의 존재에 의해 그 물질과 농도에 따라 평형동결온도가 낮아지는 구성적 과냉(構成的 過冷)현상이 발생한다. 또 동결이 진행함에 따라 용질이 석출되면서 생기는 구성적 과냉때문에 일반 순수빙과 달리 고액공존의 불균질층이 나타나고 용질의 종류, 농도, 냉각조건 및 대류의 영향에 따라 다양한 성상을 나타낸다.

Terwilliger[23]는 실린더에서 염화나트륨 수용액의 동결실험을 통하여 용질의 석출현상을 관찰했으며, 농축된 용질의 경계층이 고액경계면 근처에서 형성되며 구성적 과냉각 및 동결구동포텐셜이 동결계면 부근의 농도와 용질의 재분포에 큰 영향을 미치는 중요한 인자임을 실험적으로 연구하였다.

林[24]등은 구형용기내의 수평냉각면상에 있는 염화나트륨수용액의 동결에 관해 실험 및 해석을 행하였다. 그들은 냉각면온도를 염화나트륨수영액의 공정온도(Eutectic Point : -21.12℃)이하로 유지한 경우의 빙결정의 발생상태와 온도장의 과냉각에 관해 검토하였다. 또 해석에 있어서는 액층과 고액공존층[25] 및 고체층(공정층)의 각각에 관해 열전도방정식 및 확산방정식을 구하고 온도분포와 함께 동결층 두께의 비교

를 행하였다.

이상과 같이 수용액 동결현상에 관한 대부분의 연구는 동결로 인하여 형성된 빙의 미시적, 거시적 형태에 초점을 두고 연구되고 있으며, 해수동결에 의한 담수화에 초점을 맞추어 동결량, 염분농도 등 담수채취 가능성과 효율에 관한 검토는 그다지 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구는 LNG 냉열을 이용한 해수동결 담수화장치를 개발하는 것에 최종목적을 두고, 냉각면의 형상과 각각의 인자에 따른 해수동결현상과 염분농도의 변화를 실험적으로 검토하여 담수채취 가능성을 조사하였다.

제 2 장 실험방법 및 실험범위

2.1 실험방법 및 실험범위

본 연구에서는 기포류를 동반한 유동장에서의 해수의 동결시 발생하는 열 및 물질의 이중전달에 관한 자료를 수집하기위해 해수(Table 2.1 참조)의 평균염분농도가 3.5wt%임을 감안하여 시료로서 3.5wt%의 염화나트륨 수용액을 사용하였고, 수용액의 평균유속을 0.02m/s, 0.05m/s, 0.1m/s로 하여 유속에 따른 동결량과 염분농도의 변화를 검토하였다. 냉각면 온도는 유속에 따른 빙의 동결개시 최고온도 및 Fig.2.1의 변태도에 나타낸 바와 같이 염화나트륨 수용액의 공정온도가 -21.12℃임을 감안하여 각각 -10.0℃, -15.0℃, -20.0℃로 유지시켰다. 또한 10.0ℓ/min, 15.0ℓ/min, 20.0ℓ/min로 공기분사량을 각각 달리하여 냉각면에 분사하므로서 공기분사량에 따른 염분농도와 동결량의 변화를 조사하여 담수채취가능성을 검토하였다. 또한 냉각면의 형상을 원관과 수직 평행평판으로 하여 냉각면 형상에 따른 각각의 동결거동과 염분농도의 변화를 검토하였다. Table 2.2는 본 실험의 실험조건(Experimental conditions)이다.

시료는 정제염을 사용하여 염화나트륨 수용액을 만들었으며 시료의 염분농도는 디지털 염분계(Salinity Meter : ES-421)를 이용하여 측정하였다.

실험은 먼저 냉동기를 가동하여 브라인 탱크의 온도를 소정의 온도로 조절하고, 수용액의 초기온도를 -0.5℃로 유지시켰다. 소정의 온도로 조절된 수용액을 순환수펌프로 유량계(Magnetic Flowmeter)를 거쳐 소정의 유속으로 조절하여 시험부에 공급하였다. 또한 기포류는 압축공기를 항온항습조에서 -0.5℃로 일정하게 유지하여 소정의 유량으로 조절 후 시험부 입구단에 설치한 노즐을 통해 시험부에 분사하였다. 실험의 개시시각은 소정의 냉각온도로 조절된 브라인(에틸렌글리콜 40% 수용액)을 냉각면에 분사하는 시각으로 하여 실험 종료시까지 매 10분 간격으로 빙층의 형상 및 두께를 부위별로 계측하였으며 매 30분마다 이를 가시화 하였다. 또한 추적입자(Tracer)로서는 Nylon12를 사용하였으며, PIV계측[26] [27]을 통하여 냉각면 주위의 유동특성이 동결거동 및 염분농도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험의 종료시각은 냉각면과 동결계면과의 온도구배와 수용액의 강제대류간에 열평형이 이루어져 빙의 성장이 더 이상 없는 정상상태를 기준으로 하였고, 실험종료 후 빙을 채취하여 각부의 염분농도를 디지털 염분계로 측정하였으며, 동결량의 각부의 빙의 두께측정 및 최후 동결량의 무게를 측정하므로서 산정하였다.

Ingredient	Proportion (wt%)
Sodium Na^{+}	1.0561
Magnesium Mg^{2+}	0.1272
Calcium Ca^{2+}	0.0400
Potasium K^{+}	0.0380
Chloride Cl^{-}	1.8980
Sulfate SO_4^{2-}	0.2649
Bicabonate $HCO_{3-}{}^{-}$	0.0142
Bromide Br^{-}	0.0065
Other Solids	0.0034
Total Dissolved Solids	3.4483
Density (20℃)	1.0243×10^{-3}
Water	96.5517

Table 2.1 The principal ingredient of sea water

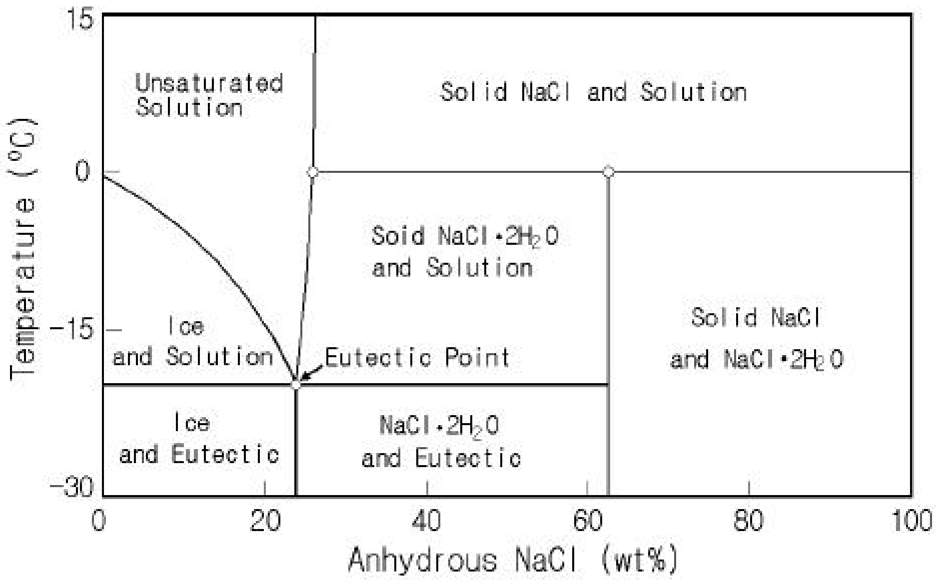


Fig. 2.1 Equilibrium phase diagram of aqueous solution

Condition	**Range**		
Temperature of Sea Water (T_i, ℃)	-0.5		
Temperature of Air-Bubble (T_{air}, ℃)	-0.5		
Fluid Velocity (U_i, m/s)	0.02	0.05	0.1
Temperature of Cooled Part (T_w, ℃)	-10.0	-15.0	-20.0
Air-Bubble Flow Rate (Q_{air}, ℓ/min)	10.0	20.0	30.0

Table 2.2 Experimental conditions

2.2 PIV

PIV(Partical Image Velocimetry, 입자영상유속계)는 원리적으로 추종성이 우수한 입자를 작동유체와 혼합하여 광원을 주사하므로서 유동장을 가시화하고 얻어진 영상을 처리하여 미소시간간격 동안에 이동한 다수의 입자의 이동변위를 획득함으로서 속도벡터, 유동패턴 및 다양한 유동정보를 획득할 수 있는 새로운 계측기법이다[28].

고속유동장의 속도계측을 위해서 유동장의 영상기록에 미소한 시간간격이 설정되므로 시간해상도가 큰 고속카메라가 적합하지만 고속카메라는 변환속도, 기동면에서 미케니컬스케너(Mechanical scanner)보다는 우수하나 분해능력에서 공간해상도가 부족하고 매우 고가이다. 따라서 본 연구에서는 화상의 기록보존 및 반복처리작업을 위하여 8mm캠코더(512×480pixel)를 이용해 유동장의 재현성을 확보하였다.

화상처리장치는 처리해야할 화상데이터를 외부로부터의 동작지시에 따라 소정의 화상처리를 행하는 장치로서, 본 연구에서는 고가의 전용장치를 사용하는 대신 호스트컴퓨터로서 개인용 컴퓨터를 사용하고 내장형 이미지보드를 사용하여 켐코더로 확보한 아날로그 영상신호를 샘플당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호, 즉 일차원의 이진화일로 저장된 각 pixel의 계조치(gray level)를 하드디스크에 저장하였다. 그외 계조변화나 강조처리 등의 영상처리조작은 호스트 컴퓨터인 PC에서 별도의 처리소프트웨어(CACTUS'97)를 이용하였다.

속도벡터를 구하는 동일입자 확인의 방법은 PIV계측에 있어서 가장

중요하게 인식되고 있다. 본 연구에서는 처리소프트웨어 제작사에서 제공하는 계조치상호상관법을 처리 알고리즘으로 사용하여 운용 소프트의 기본 명령어에 따라 속도벡터를 구하였다.

2.3 해수의 동결거동

Fig. 2.2는 냉각면온도를 빙점이하로 유지시켰을 때 시간경과에 따른 빙의 성장 메카니즘을 나타낸 것이다. 초기온도(T_i)의 해수를 빙점하의 냉각면 온도(T_w)에 노출시키면 해수중에 포함된 염분농도에 의해 응고점이 순수한 물의 평형동결온도보다 낮은 온도에서도 얼지않는 과냉각 현상이 발생한다. 이러한 과냉각도는 시간의 경과와 함께 증대되다가 어떤 과냉각온도에서 돌연 과냉각온도에서 해방되고, 그 순간 빙핵의 생성이 일어나며 과냉각도가 큰 부분에서 1차 침상빙(Dendritic Ice)이 발생하게된다. 이후 1차 침상빙의 성장방향과 거의 수직한 방향으로 조밀한 간격의 2차 침상빙이 형성되어 성장해감으로서 주위의 1차 침상빙에서 성장한 2차침상빙과 만나게 된다. 이때 빙결정의 생성에 의해 석출된 고농도의 용질이 몰입되어 동결층이 침상빙과 고농도수용액으로 이루어진 고액공존층이 형성되어 동결된 빙의 염분농도가 상승하는 현상을 발생시킨다.

한편, 침상빙의 성장에 의해 침상빙의 응고잠열이 주위로 방출됨에 따라 주변의 온도가 상승되고, 수용액의 유동에 따른 대류열전달효과로 인해 냉각면에서 비교적 거리가 먼 1차 침상빙의 끝단에서는 융해가 발생하게 된다. 이때 수용액의 흐름의 영향에 의해 다소의 용질이 제거되게 되며 그림과 같이 편평한 빙층이 형성되게 된다.

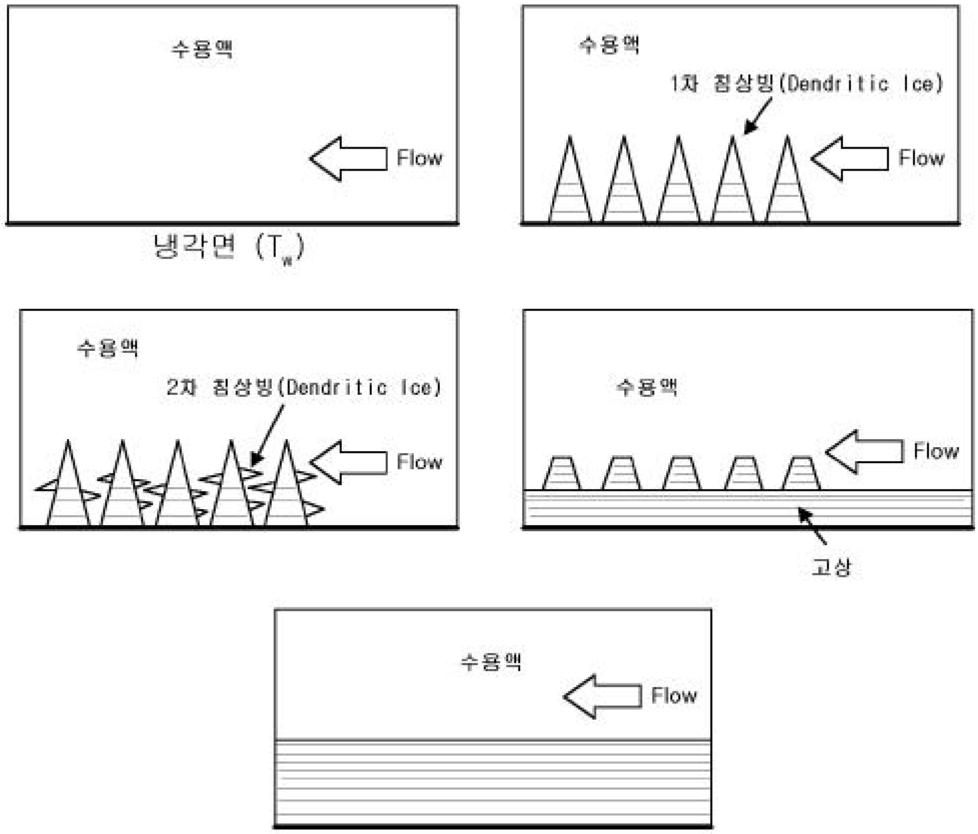


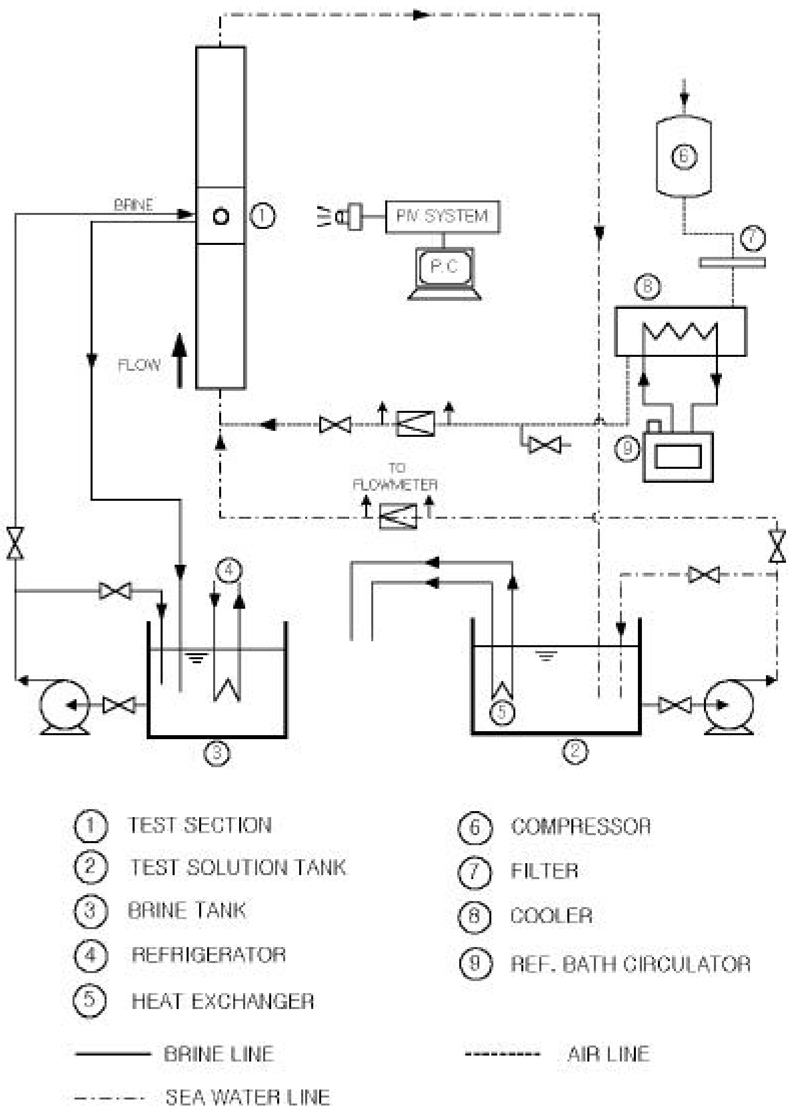
Fig. 2.2 Model of sea water freezing behavior

제 3 장 냉각원관에서의 해수동결

3.1 실험장치

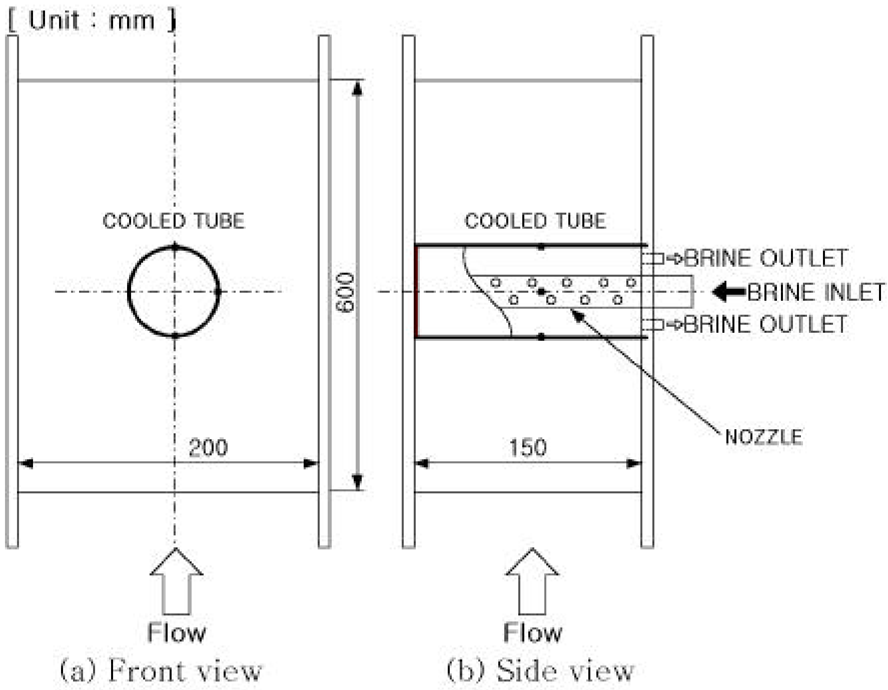
Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 실험장치의 전체 계통도와 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험장치는 크게 시험부, 냉각면을 소정의 온도로 유지해 주기위한 브라인 순환부, 수용액을 일정한 온도와 속도로 유지하기 위한 수용액 순환부, 동결면에 일정한 온도의 기포를 분사하기 위한 공기분사부, 동결이 진행되는 동안 냉각면 및 수용액의 온도를 측정하기 위한 온도계측부 및 수용액의 동결층 형상을 촬영하기 위한 가시화부로 구성되어 있다.

먼저 시험부(Test Section)는 200×150×1800mm의 구형용기로 가시화를 위해 두께 15mm의 투명아크릴로 제작하였고, 구형용기의 중간위치에 외경 66.8mm, 두께 2mm, 길이 150mm의 원형동관을 설치하였다. 동관내에는 노즐을 설치하여 냉각면에 균등하게 브라인을 분사하므로써 냉각면의 온도를 일정하게 유지하도록 하였다. 냉각면 온도(T_w)를 측정하기 위하여 동관의 표면에 Fig. 3.2와 같이 동관 중간위치의 상, 중, 하부에 각각 3개의 열전대(C-A Type)를 설치하였다. 또한, 구형용기의 입·출구 및 공기 분사노즐의 전단에도 열전대를 설치하여 수용액과 기포의 온도를 검출하여 각각의 온도를 조절하도록 하였다. Fig. 3.3은 본 실험의 실험장치의 전경사진이다.



실험장치 개요도

Fig. 3.1 Schematic of experimental apparatus



Cooled Tube (ø66.8) · Thermocouples

Nozzle (ø22.0)

Fig. 3.2 Details of test section

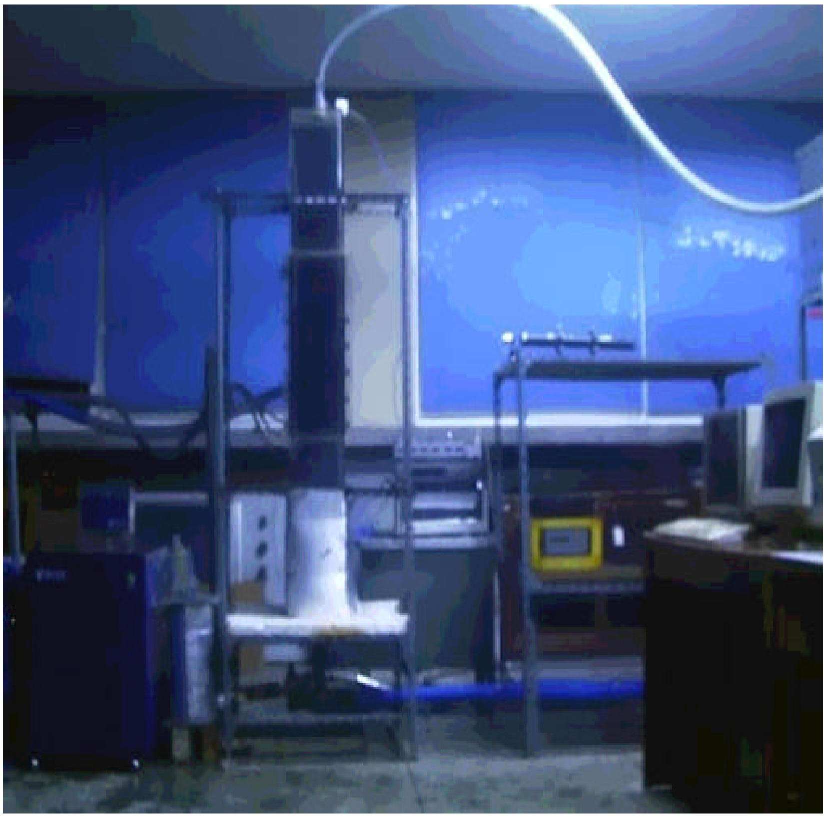


Fig. 3.3 Photograph of experimental apparatus

3.2 냉각원관의 열전달 해석

냉각원관의 열전달 해석을 위해선 먼저 원통형 좌표계에 대한 열전도방정식이 결정되어야 한다.

Fig. 3.4와 같은 중공원통형 관을 놓고 반지름을 r, 높이 H라고 할 때 원통좌표계 열전도방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}\left(k\frac{\partial T}{\partial \phi}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

반경방향으로만 열전달이 존재하고 내부 발열이 없는 정상상태 조건하에서는 $\frac{\partial T}{\partial \phi}=0$, $\frac{\partial T}{\partial z}=0$, $q=0$, $\frac{\partial T}{\partial t}=0$이므로, 식(3.1)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right)=0 \quad (3.2)$$

반경방향 r이 되는 곳의 원통표면을 통과해서 전도되는 열전달량 q_r은

$$q_r=-kA\frac{\partial T}{\partial r}=-k(2\pi rH)\frac{\partial T}{\partial r} \quad (3.3)$$

식(3.2)를 적분하여 $\frac{\partial T}{\partial r}$를 구하여 식(3.3)에 대입함으로써 열전달량 q_r을 구할 수 있다.

식(3.2)에서 반경방향 r에 대하여 k가 일정하다고 가정하면,

$$\partial\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = 0 \tag{3.4}$$

이다. 식(3.4)를 부정적분하면,

$$r\frac{\partial T}{\partial r} = C_1 \tag{3.5}$$

식(3.5)를 변수 분리하면,

$$\partial T = \frac{C_1}{r}\,\partial r \tag{3.6}$$

식(3.6)을 다시 부정적분하면,

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \tag{3.7}$$

식(3.7)은 계의 반경방향의 온도분포를 나타내는 식이다. 이 식에서 적분상수 C_1과 C_2를 구하기 위해서는 경계조건,

$r = r_i$에서, $T = T_2$

$r = r_o$에서, $T = T_1$

를 적용하면 식(3.7)은,

$$T(r_i) = T_2 = C_1 \ln r_i + C_2 \tag{3.8}$$

$$T(r_o) = T_1 = C_1 \ln r_o + C_2 \tag{3.9}$$

$$T_2 - T_1 = C_1(\ln r_i - \ln r_o) = C_1 \ln \frac{r_i}{r_o}$$

$$\therefore C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \tag{3.10}$$

식(3.10)**을 식**(3.9)**에 대입하면**,

$$T_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r_o + C_2$$

$$\therefore C_2 = T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_1}{r_o}} \ln r_o \tag{3.11}$$

식(3.10)**과 식**(3.11)**을 식**(3.7)**에 대입하면**,

$$T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r + T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln r_o$$

$$\therefore T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \ln \frac{r}{r_o} + T_1 \tag{3.12}$$

식(3.12)**으로부터 반경방향의 온도분포를 알 수 있다**. **그리고 식**(3.10)**을**

식(3.5)에 대입하면,

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \frac{1}{r} \tag{3.13}$$

식(3.13)을 식(3.3)에 대입하면 반경방향으로의 전열량을 구할 수가 있다.

$$q_r = -k(2\pi rH)\frac{\partial T}{\partial r} = -k(2\pi rH)\frac{(T_2 - T_1)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \frac{1}{r} \tag{3.14}$$

$$q_r = 2\pi kH \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \tag{3.15}$$

따라서, 열전달율의 계산은 Fig. 3.4와 같이 동관 표면의 온도를 측정하여 열유속 q_{r1}을 구하고, 동결층표면에서 열유속 q_{r2}는 식(3.17)에 의해, 열유속의 방향을 반경방향으로 가정하여 식(3.16)과 식(3.17)식을 같다고 보고 계산하여 식(3.18)식에 의해 구할 수 있다.

$$q_{r1} = -\lambda \cdot (T_1 - T_2)/\delta \tag{3.16}$$

$$q_{r2} = h(T_{fs} - T_i) \tag{3.17}$$

$$h = \lambda \cdot (T_1 - T_2)/[\delta(T_{fs} - T_i)] \tag{3.18}$$

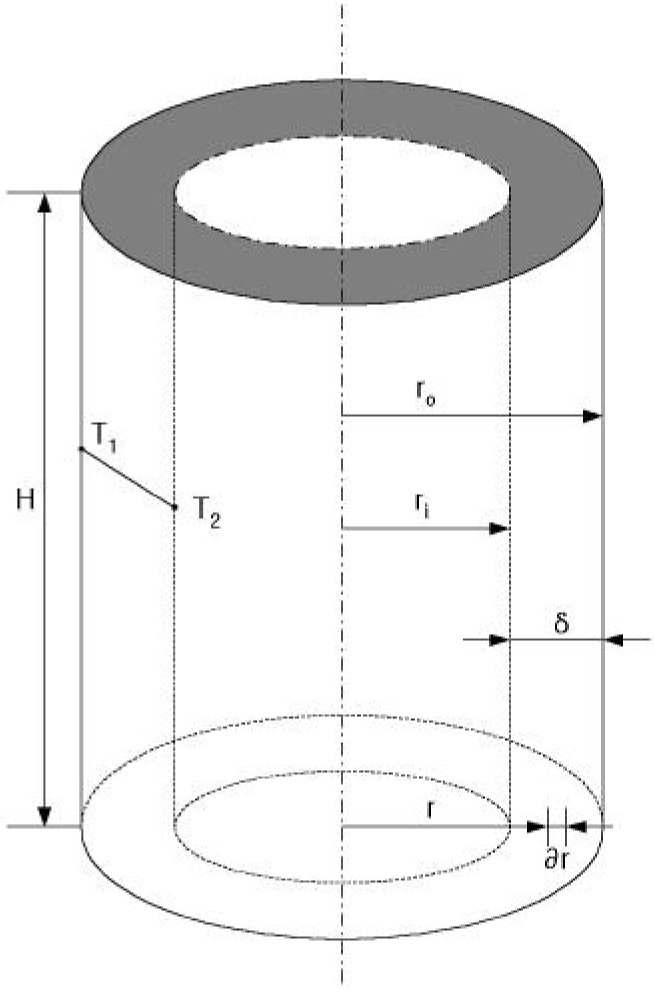


Fig. 3.4 One dimentional heat transfer model in a cylindrical tube

3.3 냉각원관 주위에서의 해수동결거동

Fig. 3.5와 Fig 3.6은 작동유체의 유속을 0.05m/s로 유지하고 공기를 30ℓ/min로 분사한 경우의 냉각원관 주위의 작동유체의 흐름을 PIV 계측을 이용하여 분석한 평균속도벡터와 평균속도프로필이다. 그림에서와 같이 시험부 하부에서 일정유속으로 흘러 들어온 작동유체는 유로면적이 좁아지는 냉각부의 정체점(stagnation point)에서 냉각원관의 후부로 가면서 교축작용에 의해 유속이 증가하며, 원관후부에서는 후류(reversal flow)가 대칭적으로 발생하고 주류와 후류의 간섭에 의해 경계층(boundary layer)이 생성된다. 이와 같은 유동양식은 빙의 생성과 염분농도에 밀접한 연관을 가진다.

시험부 하부에서 유입된 작동유체는 냉각원관의 하부에서 상부로 상승하면서 평형동결온도이하로 냉각되어 유속이 상대적으로 느린 상부면부터 착빙이 되면서 순간적으로 냉각원관 전체에 걸쳐 빙이 생성된다. 냉각원관의 위치별로 살펴보면 비교적 유속이 느리고 기포의 충격이 작은 상부면이 중간부 및 하부면에 비해 동결속도가 큰 것을 알 수 있다.

실험초기는 냉각면과 작동유체 사이의 큰 온도구배로 급격하게 빙이 성장하지만 빙의 동결량이 증가할수록 빙 자체가 열저항으로 작용해 동결계면으로의 열유속을 방해할 뿐만 아니라 교축작용을 심화시켜 속도의 증대를 가져옴으로써 빙의 성장률은 급격히 저하하다가 냉각면에서 동결계면으로의 열유속과 동결계면에서 해수로의 대류열전달율이 같아지는 정상상태(steady state)에 다다르게 된다.

한편, 초기에 생성된 빙의 조직은 급속한 침상빙의 성장으로 인해 조직이 치밀하지 못하고 희고 푸석푸석한 상태의 조직이며, 빙의 평균 염분농도는 1.7wt%로 비교적 높게 나타났다. 이는 급속한 빙의 성장으로 인해 빙결정에 의해 석출된 NaCl이 빙면밖으로 배제되지 못하고 침상빙의 동결층 내부로 다량의 용질이 함께 몰입하기 때문이다. 그러나, 시간이 경과하면서 빙의 두께에 의한 동결속도의 저하와 유속변화에 따른 강제대류작용의 증대로 인해 침상빙 형성의 억제 및 석출된 용질의 제거작용의 증대로 인해 말기에 생성된 빙의 염분농도는 0.62wt%의 낮은 염분농도를 나타내었다. Fig. 3.7은 앞에서 설명한 결과를 냉각면의 방위별 염분농도를 나타낸 그림으로 빙의 성장률이 빠른 상부면이 중·하부면에 비해 높은 염분농도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 초기 급격한 온도구배에 의해 성장한 빙의 염분농도가 정상상태의 동결층의 염분농도에 비해 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다.

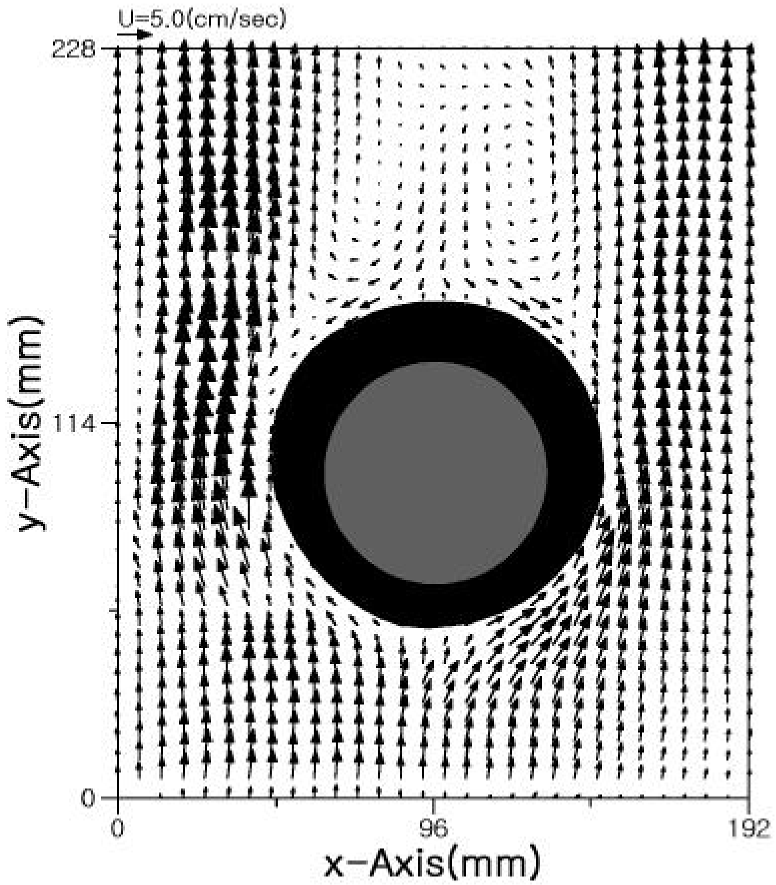


Fig. 3.5 Time-mean velocity vector around a cooled cylindrical tube

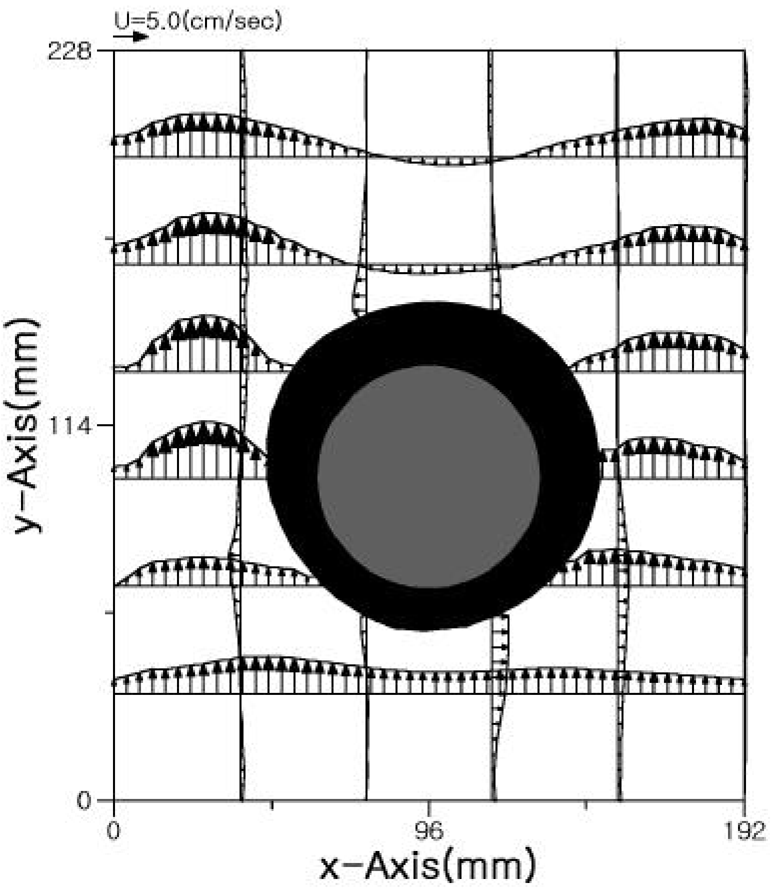


Fig. 3.6 Time-mean velocity porfile around a cooled cylindrical tube

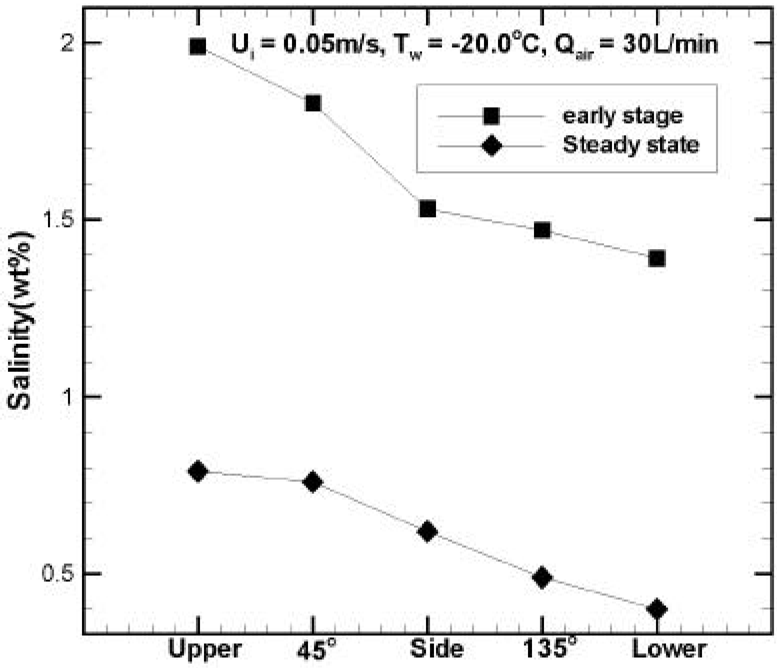


Fig. 3.7 Distribution of salinity in the frozen layer

; U_i=0.05m/s, T_w=-20.0℃, Q_{air}=30ℓ/min

3.4 유속의 영향

Fig. 3.8과 Fig. 3.9는 T_w=-20℃, Q_{air}=10ℓ/min에서 염화나트륨 수용액의 유속의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험초기에는 냉각면에서 동결계면으로의 큰 온도구배에 따른 열유속의 지배를 받아 급속히 빙이 성장하다가 점차 유속의 영향을 지배적으로 받게 되므로써 빙의 성장속도가 둔화되어 정상상태에 다다름을 확인할 수 있다. 또한, 유속이 빠를수록 대류열전달율이 증대하여 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 3.10 Fig. 3.12는 유속에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 3.13은 Fig 3.8과 동일 조건에서 정상상태에 있어서 유속의 변화에 따른 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 전체 동결량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 빙의 형태를 보면 유속이 낮은 0.02m/s의 경우의 동결층의 형상은 정방형으로 거의 원형에 가깝게 나타나지만, 유속이 증가할수록 상부면(흐름의 하부)으로 갈수록 동결층이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 유속의 증가에 따라 원관하부의 정체점, 가속이 진행되는 중간부 및 박리영역 그리고 상부면의 정체점 등 각각의 부위별로 대류열전달율이 확연한 차이를 보이기 때문으로 생각된다.

한편, 빙의 조직은 유속이 낮은 0.02m/s의 경우에 비해 유속이 큰 0.1m/s의 경우에 생성된 빙이 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을

생성하였는데 이는 유속이 증가함에 따라 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미치며, 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도의 변화를 유속에 따라 나타내면 Fig. 3.14과 같다. 그림으로부터 유속이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나 전체 생성빙의 염분농도는 Fig. 3.15에서 나타낸 바와 같이 유속이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도는 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 유속이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기 큰 열유속에 의해 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 유속의 증가에 따른 용질의 제거효과를 능가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 급격히 상승하는 경향을 보인다.

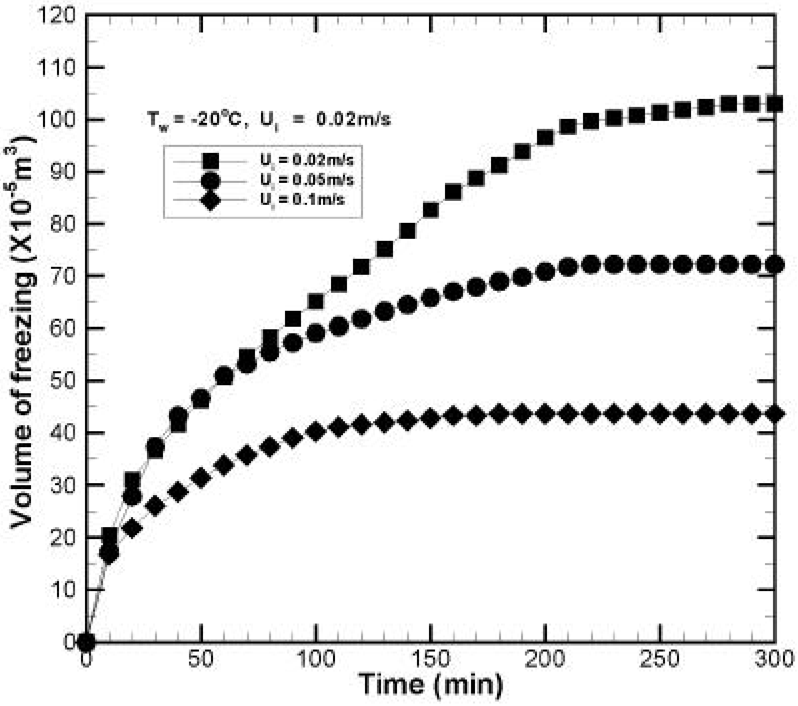


Fig. 3.8 Effect of fluid velocity on volume of freezing

; Q_{air}=10 ℓ / min, T_w =- 20℃

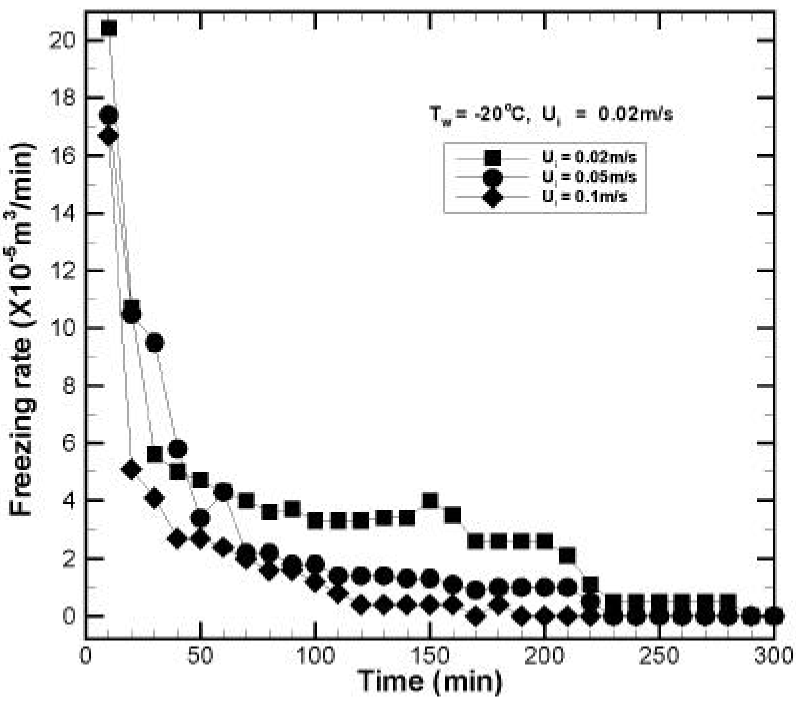
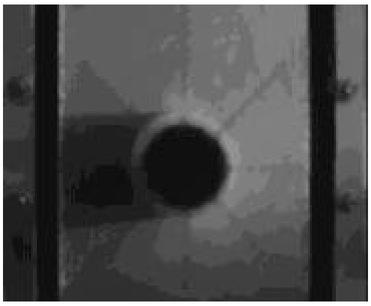
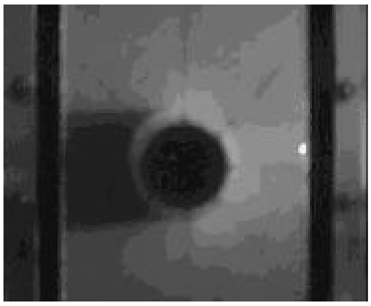


Fig. 3.9 Effect of fluid velocity on freezing rate

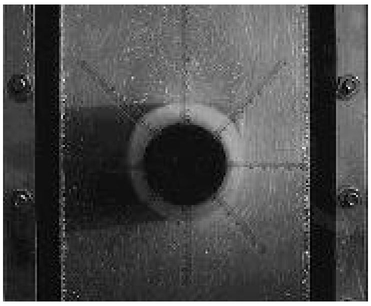
; Q_{air}=10 ℓ / min, T_w =- 20℃



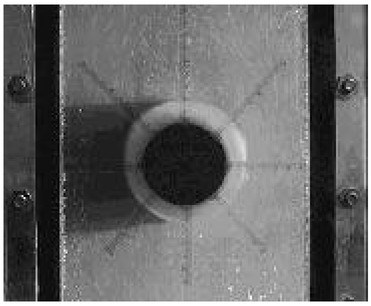
(a) 30min



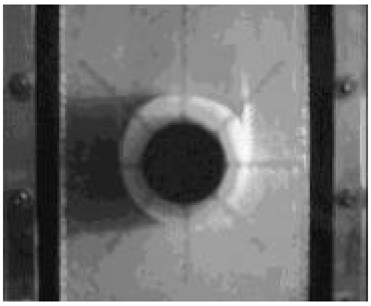
(b) 60min



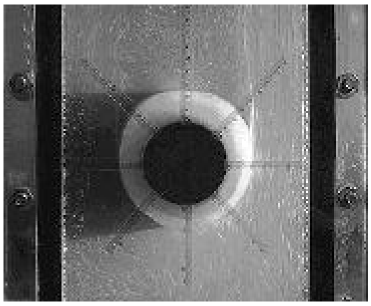
(c) 90min



(d) 120min



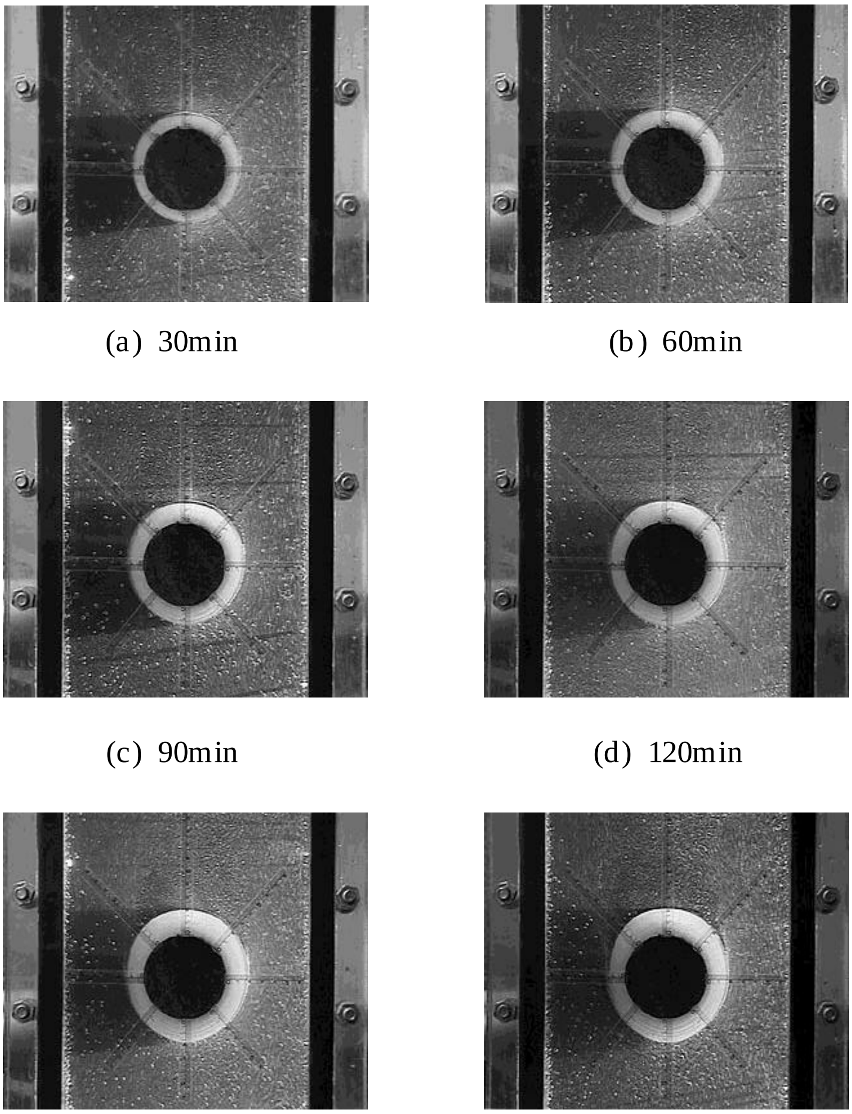
(e) 180min



(f) 240min

Fig. 3.10 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃



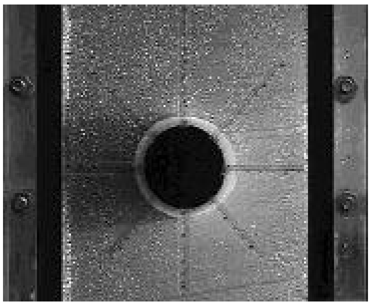
(a) 30min (b) 60min

(c) 90min (d) 120min

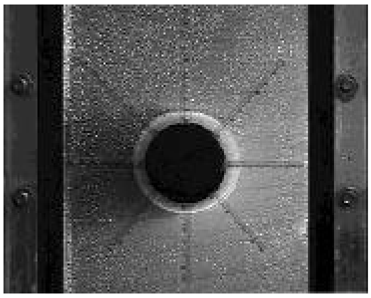
(e) 180min (f) 240min

Fig. 3.11 Freezing behavior of sea water

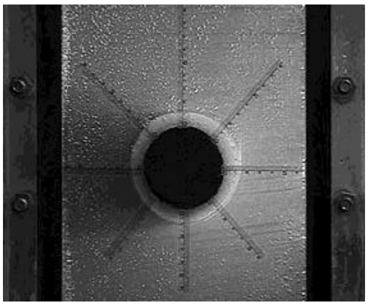
; U_i=0.05m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃



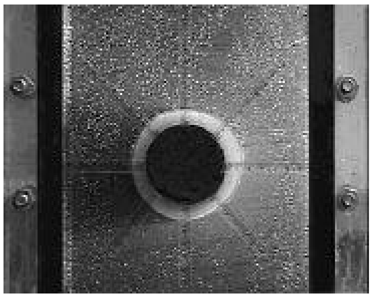
(a) 30min



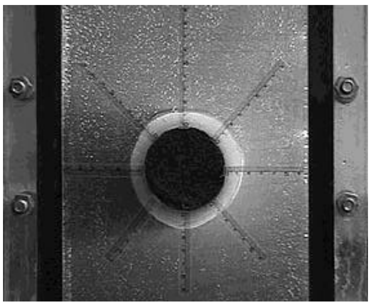
(b) 60min



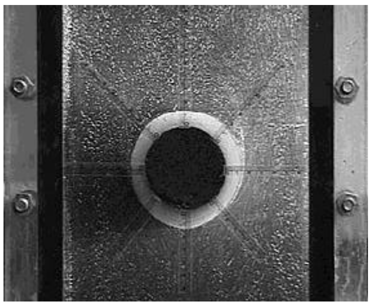
(c) 90min



(d) 120min



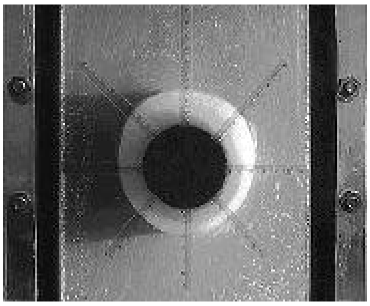
(e) 180min



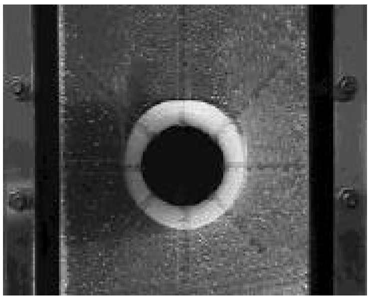
(f) 240min

Fig. 3.12 Freezing behavior of sea water

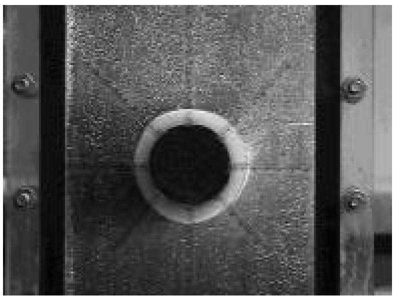
; U_i=0.1m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃



(a) U_i=0.02m/s



(b) U_i=0.05m/s



(c) U_i=0.1m/s

Fig. 3.13 Effect of fluid velocity on freezing behavior

; Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃

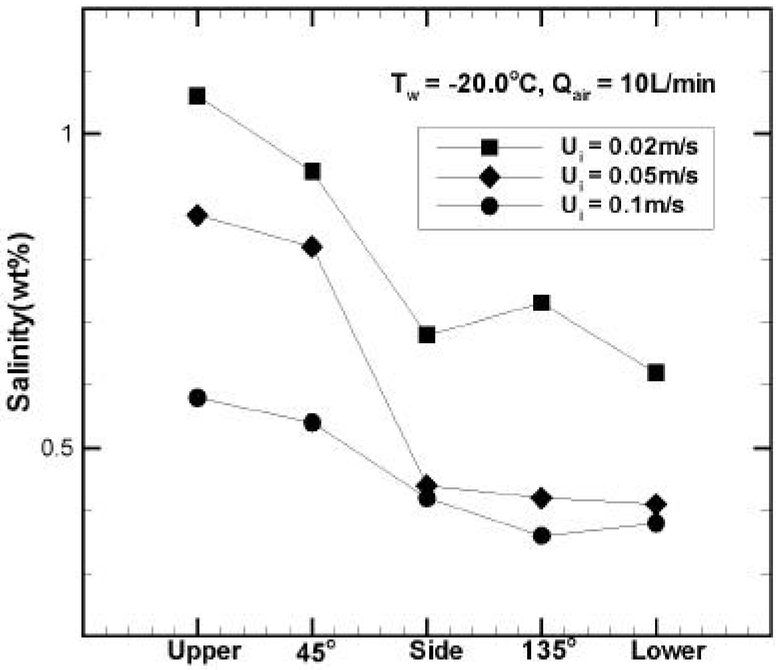


Fig. 3.14 Salinity of external frozen layer in the steady state ; Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃

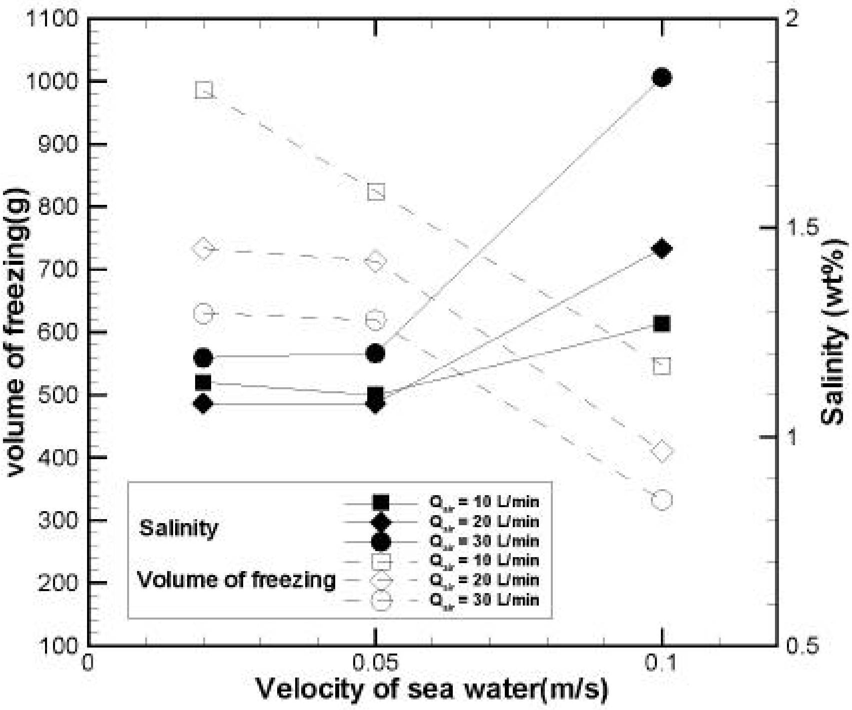


Fig. 3.15 Mean salt concentration of frozen layer ; T_w =-20℃

3.5 공기 분사량의 영향

Fig. 3.16과 Fig. 3.17는 T_w=-20℃, U_i=0.02m/s에서 공기 분사량의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 전술한 유속의 영향과는 약간의 차이는 있지만 실험개시 후 약 30분까지 급격한 빙의 성장을 보이다가 그 후 점차 동결량이 감소하여 정상상태에 이르는 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 공기 분사량이 증가할수록 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 3.18 Fig. 3.20은 공기 분사량에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 3.21은 Fig 3.16과 동일 조건에서 정상상태의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가함에 따라 전체 동결량이 현저하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 동결계면에 가해지는 기포의 충격력이 증가하고, 기포류(air-bubble flow)가 동결계면과 해수의 접촉을 방해하는 절연제 역할을 하여 동결계면에서 해수로의 열전달을 방해하기 때문으로 생각된다.

한편, 빙의 조직은 공기 분사량이 작은 10ℓ/min의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 공기 분사량이 큰 30ℓ/min의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였다. 이는 공기 분사량이 증가함에 따라 기포의 충격력에 의해 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨의 제거효과가 증대하여 동결층내

에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

이러한 경향은 전술한 유속의 영향에서와 마찬가지로 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미친다. Fig. 3.22는 정상상태에 있어서 공기 분사량의 변화에 따른 동결층의 염분농도의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나 전체 생성빙의 염분농도는 전술한 유속의 영향과 비슷한 경향을 보인다. Fig. 3.23은 공기 분사량에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 공기 분사량이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도 또한 증가하는 경향을 보인다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 공기 분사량에 의한 충격력의 증가에 따른 용질의 제거효과를 능가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 상승하는 경향을 보인다.

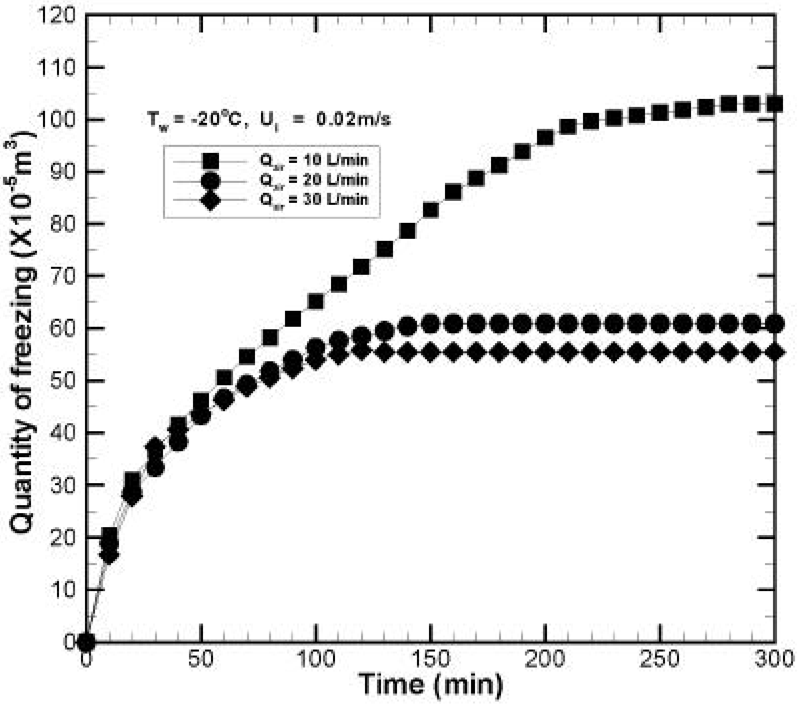


Fig. 3.16 Effect of air-bubble flow rate on volume of freezing ; T_w=-20℃, U_i=0.02m/s

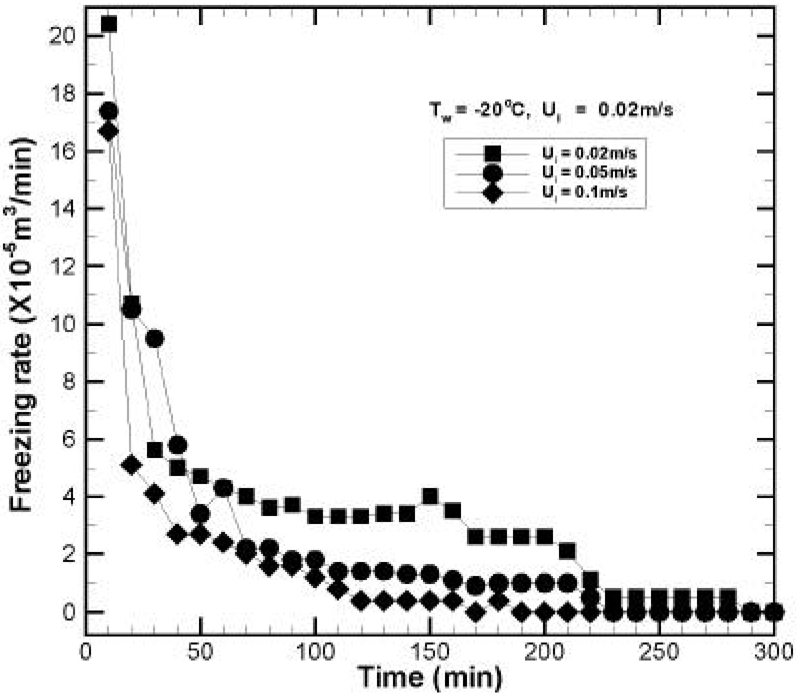
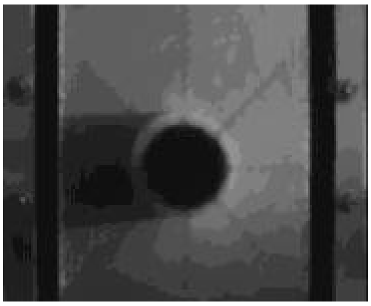
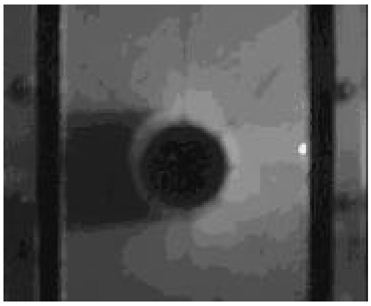


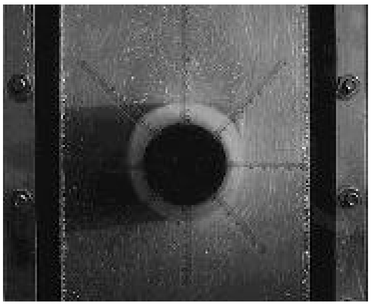
Fig. 3.17 Effect of air-bubble flow rate on volume of freezing ; T_w =-20℃, U_i=0.02m/s



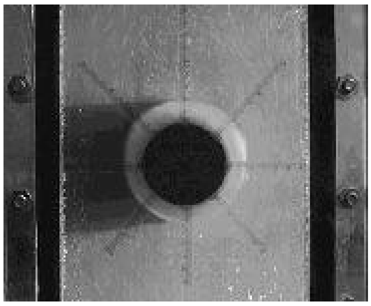
(a) 30min



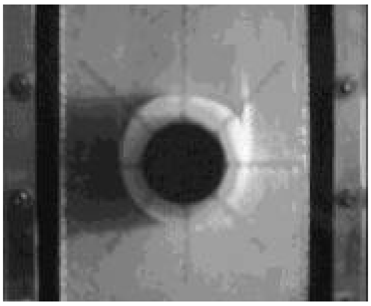
(b) 60min



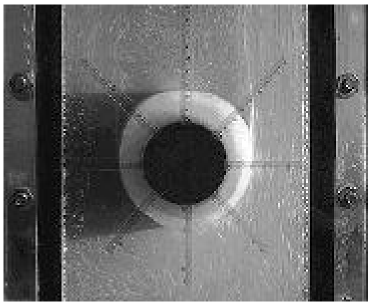
(c) 90min



(d) 120min



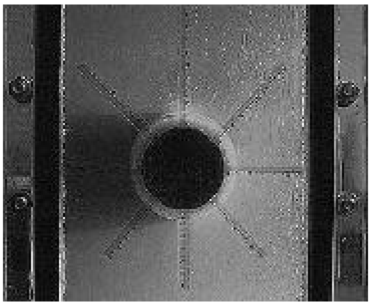
(e) 180min



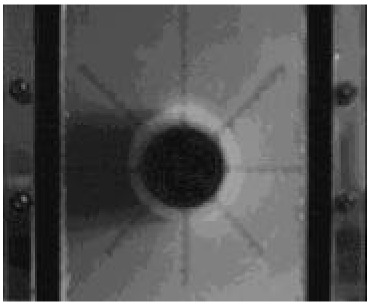
(f) 240min

Fig. 3.18 Freezing behavior of sea water

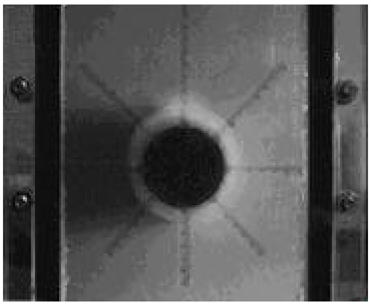
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃



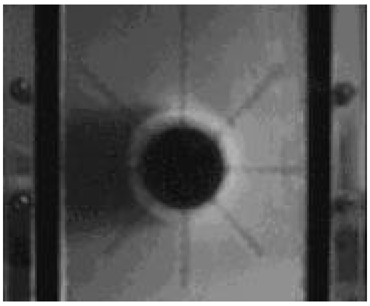
(a) 30min



(b) 60min



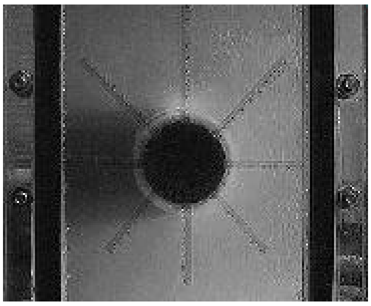
(c) 90min



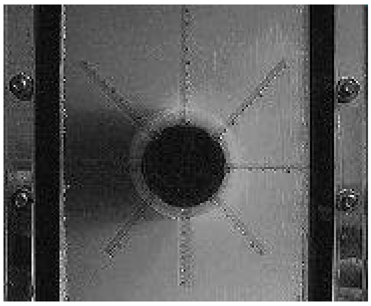
(d) 120min

Fig. 3.19 Freezing behavior of sea water

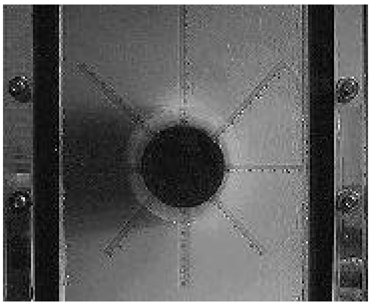
; $U_i=0.02m/s$, $Q_{air}=20\ell/min$, $T_w=-20$℃



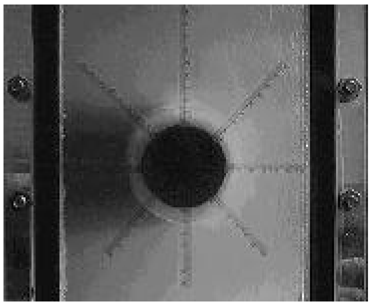
(a) 30min



(b) 60min



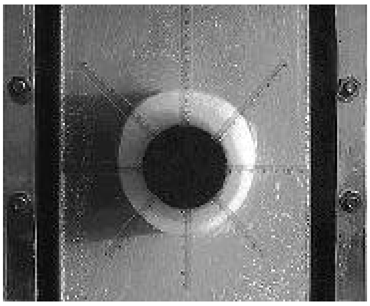
(c) 90min



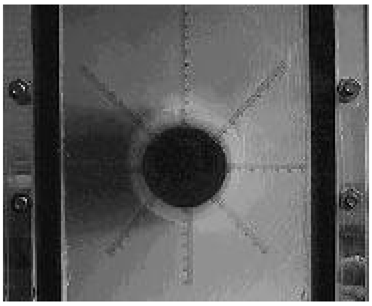
(d) 120min

Fig. 3.20 Freezing behavior of sea water

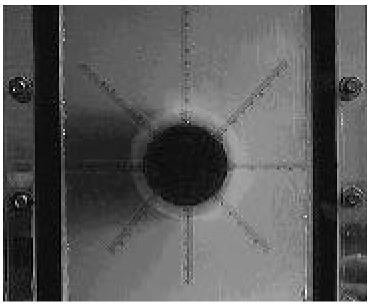
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=30ℓ/min, T_w=-20℃



(a) Q_{air}=10 ℓ/min



(b) Q_{air}=20 ℓ/min



(c) Q_{air}=30 ℓ/min

Fig. 3.21 Effect of air-bubble flow rate on freezing behavior ; T_w=-20℃, U_i=0.02m/s

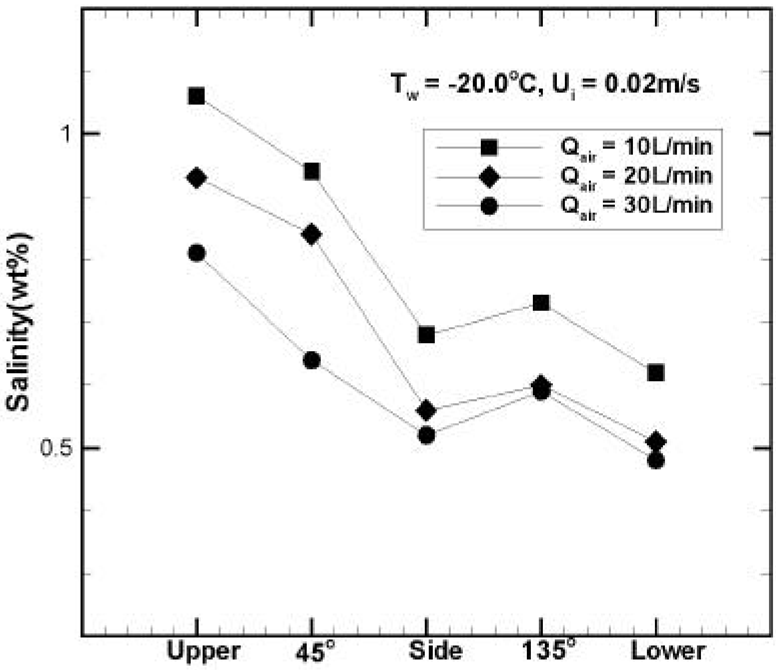


Fig. 3.22 Salinity of external frozen layer in the steady state ; T_w =-20℃, U_i=0.02m/s

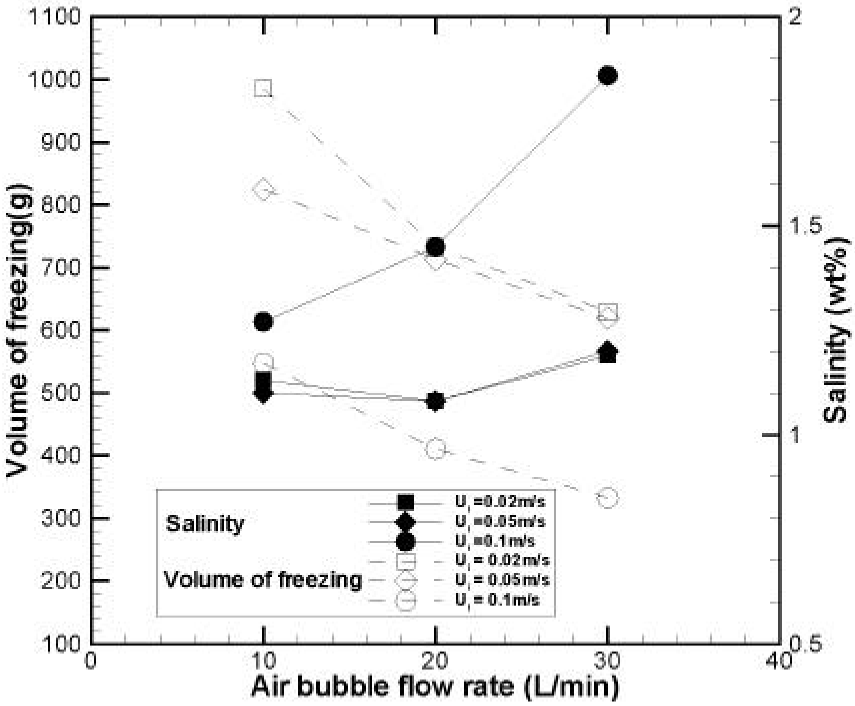


Fig. 3.23 Mean salt concentration of frozen layer

; T_w =-20℃

3.6 냉각면 온도의 영향

Fig. 3.24와 Fig. 3.25는 Q_{air}=10ℓ/min, U_i=0.02m/s에서 냉각면 온도의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험개시 후 급격한 성장을 보이다가 그 후 점차 동결량이 감소하여 정상상태에 이르는 경향을 보인다. 또한, 냉각면 온도가 T_w=-20℃일때는 빙의 성장이 실험개시 200분까지 지속적으로 이루어지나 냉각면 온도 T_w=-15℃ 이상의 경우에는 급격한 상승후에 동결량이 시간의 경과에 관계없이 일정하게됨을 알 수 있다. Fig. 3.26 Fig. 3.28은 냉각면 온도에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 3.29는 Fig 3.24와 동일 조건에서 정상상태에 있어서의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승함에 따라 전체 동결량이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 냉각면 온도가 상승할수록 즉, 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 감소할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 감소하기 때문이다.

빙의 조직은 냉각면 온도가 낮은 T_w=-20℃의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 냉각면 온도가 높은 T_w=-10℃의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였다. 이는 냉각면 온도가 상승함에 따라 열유속이 작아져 생성된 침상빙이 지속적으로 성장하지 못하고 다시 융해되어 빙의 성장 속도가 느

려지기 때문에 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨이 침상빙 사이에 몰입되지 않고 빙면 밖으로 배제되어 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

Fig. 3.30은 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도를 냉각면 온도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있는데, 그 이유는 냉각면 온도가 상승할수록 빙성장률이 둔화되어 동결에 의해 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다.

Fig. 3.31은 냉각면 온도에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 동결량은 급격히 감소하는 반면, 생성빙의 평균염분농도는 작은 범위내에서 감소하는 경향을 보인다. 이는 전술한 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 열유속이 작아져 빙의 성장이 저감되어 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 충분히 배제되기 때문이다.

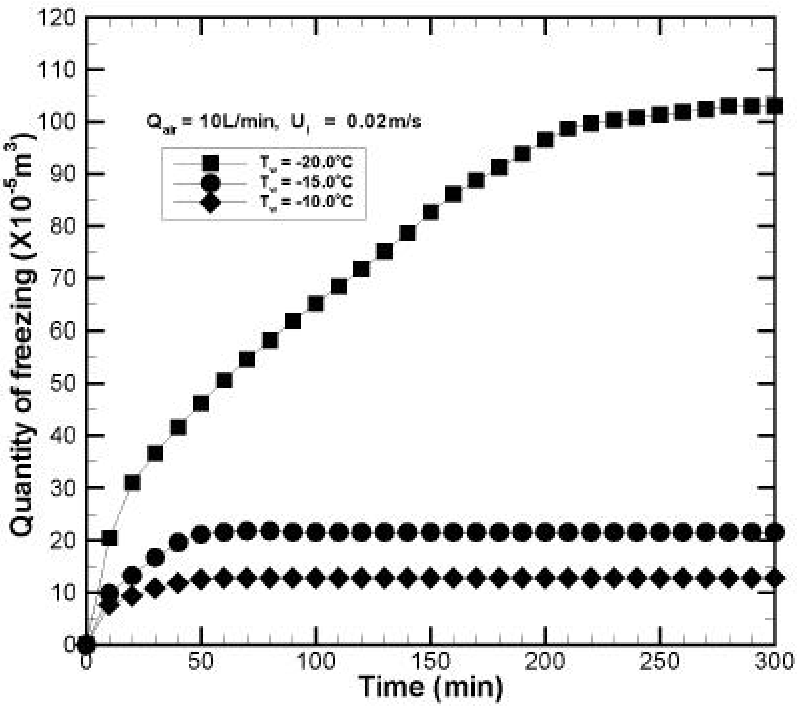


Fig. 3.24 Effect of cooled tube temperature on volume of freezing ; Q_{air}=10 ℓ/min U_i=0.02m/s

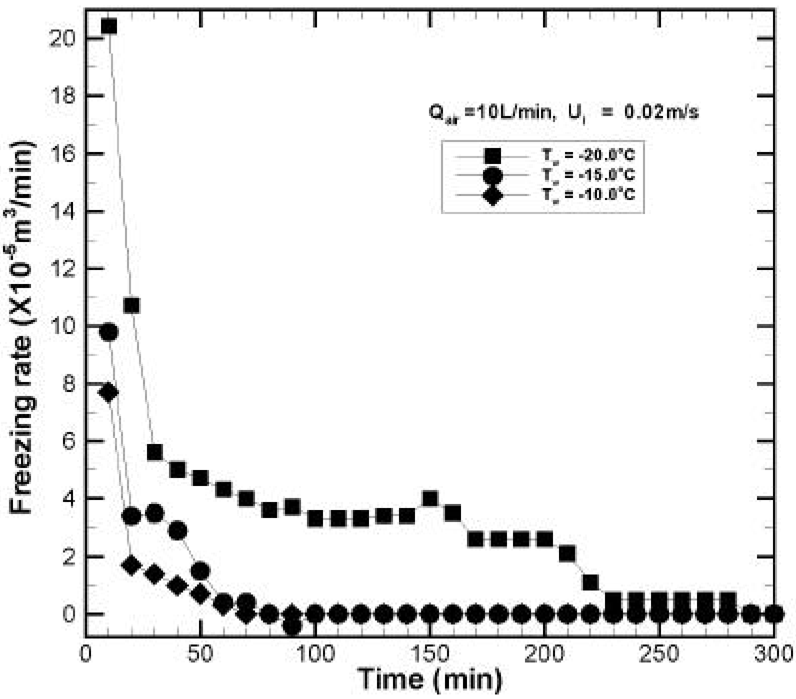
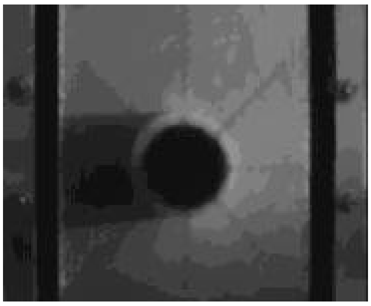
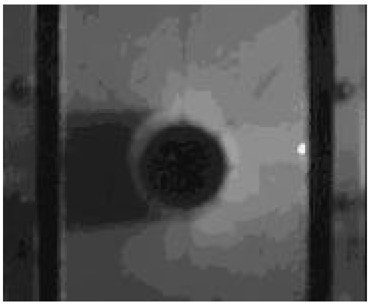


Fig. 3.25 Effect of cooled tube temperature on freezing rate

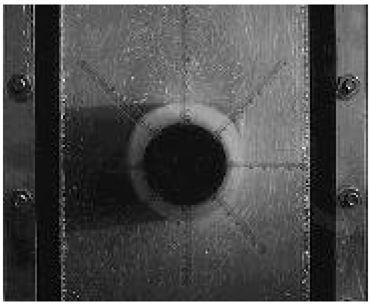
; Q_{air}=10 ℓ/min U_i=0.02m/s



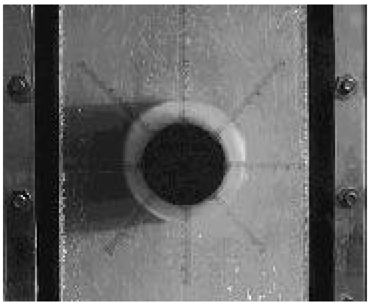
(a) 30min



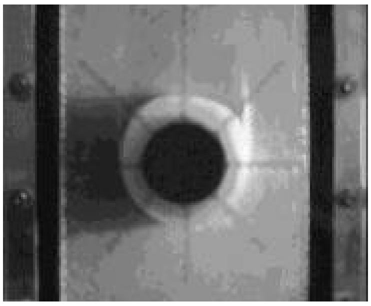
(b) 60min



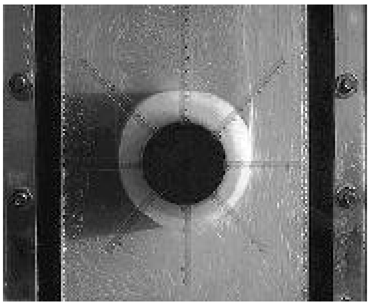
(c) 90min



(d) 120min



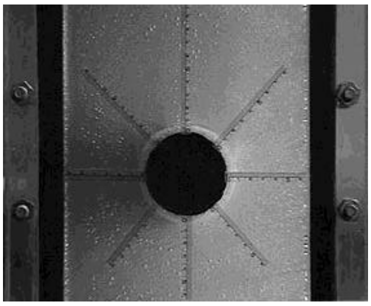
(e) 180min



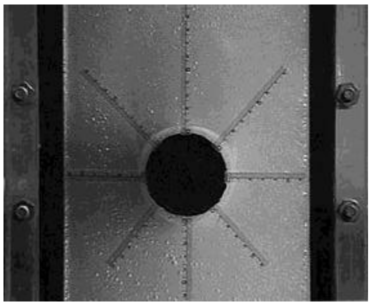
(f) 240min

Fig. 3.26 Freezing behavior of sea water

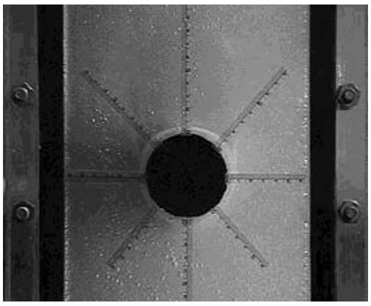
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃



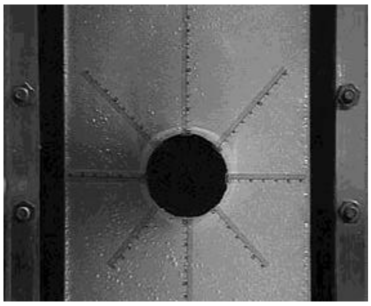
(a) 30min



(b) 60min



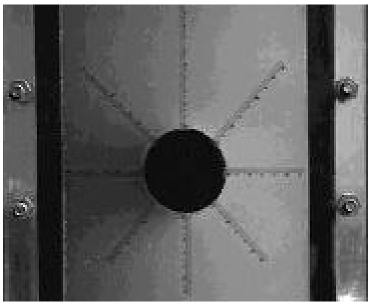
(c) 90min



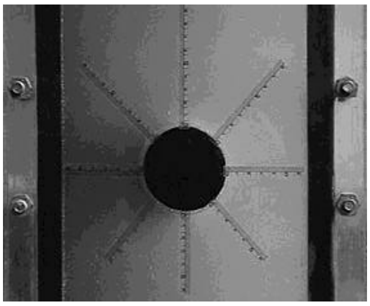
(d) 120min

Fig. 3.27 Freezing behavior of sea water

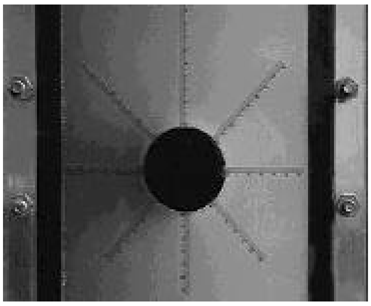
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-15℃



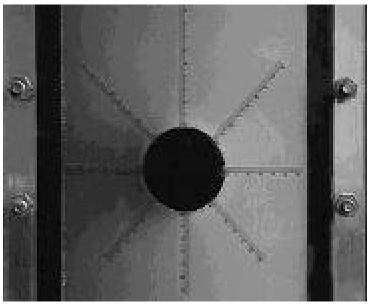
(a) 30min



(b) 60min



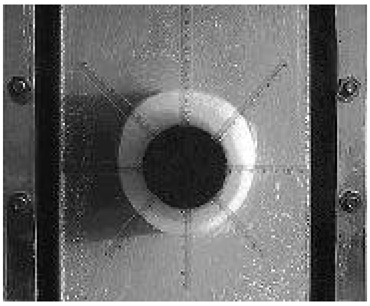
(c) 90min



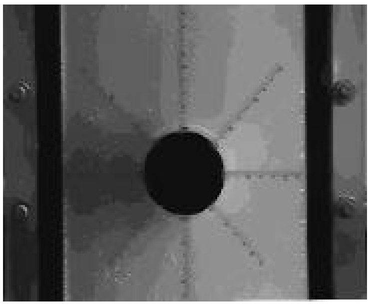
(d) 120min

Fig. 3.28 Freezing behavior of sea water

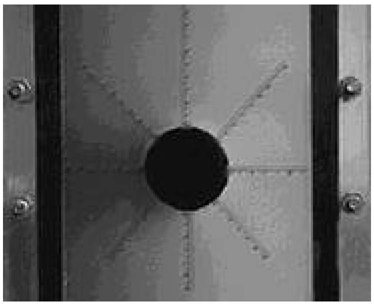
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-10℃



(a) T_w =- 20℃



(b) T_w =- 15℃



(c) T_w =- 20℃

Fig. 3.29 Effect of cooled tube temperature on freezing behavior ; Q_{air}=10 ℓ/min, U_i=0.02m/s

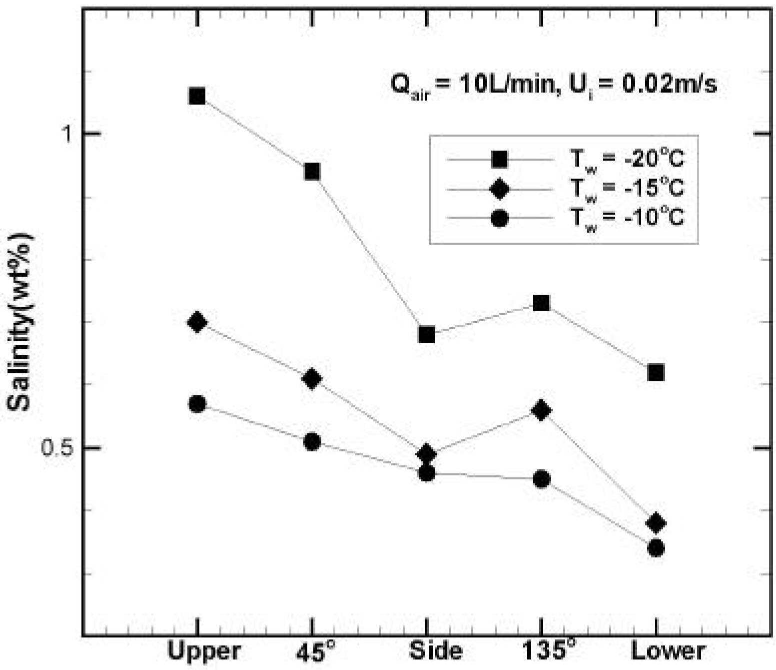


Fig. 3.30 Salinity of external frozen layer in the steady state

; Q_{air}=10 ℓ / min, U_i=0.02m/ s

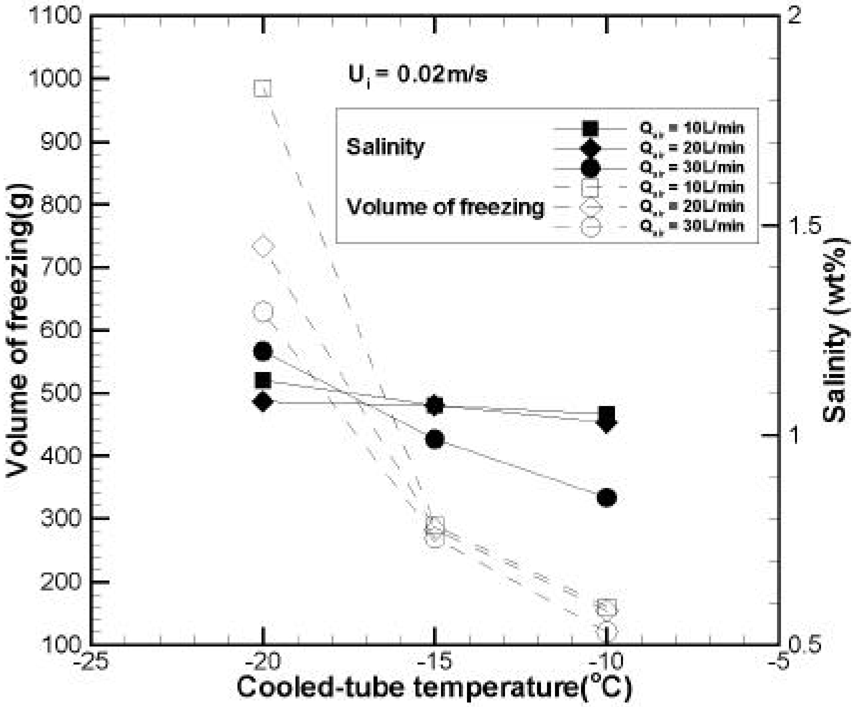


Fig. 3.31 Mean salt concentration of frozen layer ; U_i=0.02m/s

3.7 무차원 정리

본 실험의 연구결과로부터 냉각원관에서의 동결량은 시간의 경과, 유속의 감소, 공기 분사량의 감소 및 냉각면 온도의 저하와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 절에서는 실험에서 얻어진 동결량에 대한 결과들을 무차원화하여 정리하였다. 본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하면 무차원 동결량 R_f는 (3.19)식으로 정리가 가능하다.

$$R_f = f(\theta_w, Re, X) \tag{3.19}$$

여기서, R_f (무차원 동결량) $= \dfrac{V_f}{H_o}$,

θ_w(무차원 냉각면 온도) $= \dfrac{(T_f - T_w)}{(T_o - T_f)}$,

Re (레이놀즈수) $= \dfrac{U_i \cdot D_h}{\nu}$,

X (무차원 공기유량) $= \dfrac{W_{air}}{W_{air} + W_l}$

이다. 최소자승법을 이용하여 θ_w, Re, X의 함수로서 무차원 동결량 R_f를 정리하면 Fig. 3.32로 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 약 ±20%의 오차한계 범위 내에서 (3.20)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 4.27 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.75} \cdot Re^{-0.38} \cdot X^{-0.42} \tag{3.20}$$

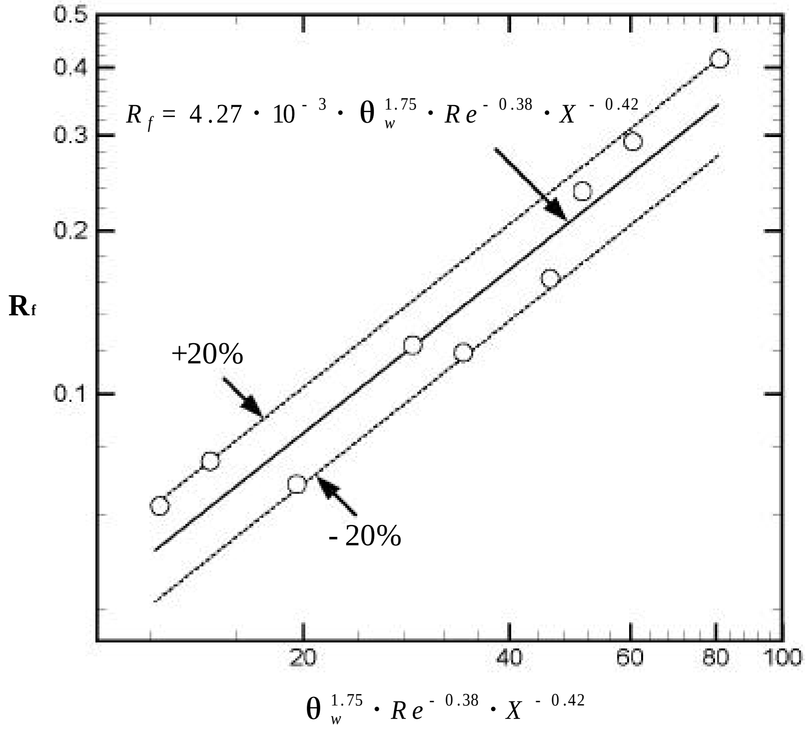


Fig. 3.32 Dimensionless frozen quantity

3.8 결 론

본 장에서는 기포류를 동반한 유동장에서 냉각원관 주위의 해수동결거동 메카니즘과 해수의 유속, 공기 분사량 및 냉각면 온도가 해수의 동결량 및 염분농도에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과, 본 실험의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험초기의 동결층의 동결속도는 냉각면과 동결계면 사이의 큰 열유속에 의해 대단히 빠르며, 생성된 빙의 염분농도는 빠른 동결속도로 인한 용질의 몰입으로 높은 염분농도를 가진다.

(2) 실험초기 급속한 성장을 보이는 초기 생성빙을 제외한 정상상태의 동결층의 표면부위의 염분농도는 해수의 유속이 클수록, 공기분사량이 증가할수록, 냉각면 온도가 높을수록 감소한다.

(3) 빙의 동결율은 해수의 유속이 작을수록, 공기 분사량이 감소할수록, 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.

(4) 전체 동결층의 평균염분농도는 해수의 유속이 증가할수록, 공기분사량이 증가할수록 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.

(5) 냉각면의 위치에 따른 동결층의 동결율과 염분농도는 냉각원관의 상부(흐름의 하류)로 갈수록 높은 동결율과 염분농도를 나타낸다.

(6) 본 실험 범위내에서 해수의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 4.27 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.75} \cdot Re^{-0.38} \cdot X^{-0.42}$$

제 4 장 수직평행 냉각평판의 해수동결

4.1 실험장치

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 실험장치의 전체 계통도와 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. 실험장치는 그림에서와 같이 시험부를 제외한 제반 장치들은 제 3장의 냉각원관주위의 해수동결에 사용된 장치와 동일한 구성으로 이루어져 있다.

시험부(Test Section)는 150 × 190 × 1800mm의 구형용기로 가시화를 위해서 두께 15mm의 투명 아크릴로 제작하였고, 상부의 후면과 하부에는 수용액의 입·출구를 만들어 해수가 안정적으로 유입될 수 있도록 하였다.

Fig. 4.2는 시험부의 상세도로서 구형용기의 중간위치에 가로 120mm, 세로 500mm, 두께 2mm의 동판을 설치하였다. 냉각면의 표면에는 등온상태를 유지하기 위하여 10개의 열전대(C-A Type)를 50mm 간격으로 각각 부착하였다. 또한, 등간격으로 노즐을 설치하여 냉각면에 균등하게 브라인을 분사하므로써 냉각면을 일정하게 유지하였다. 또한, 구형용기의 입·출구 및 공기 분사노즐의 전단에도 K Type의 열전대를 설치하여 수용액과 기포의 온도를 검출하여 각각의 온도를 조절하도록 하였다. Fig. 4.3은 본 실험의 실험장치의 전경사진이다.

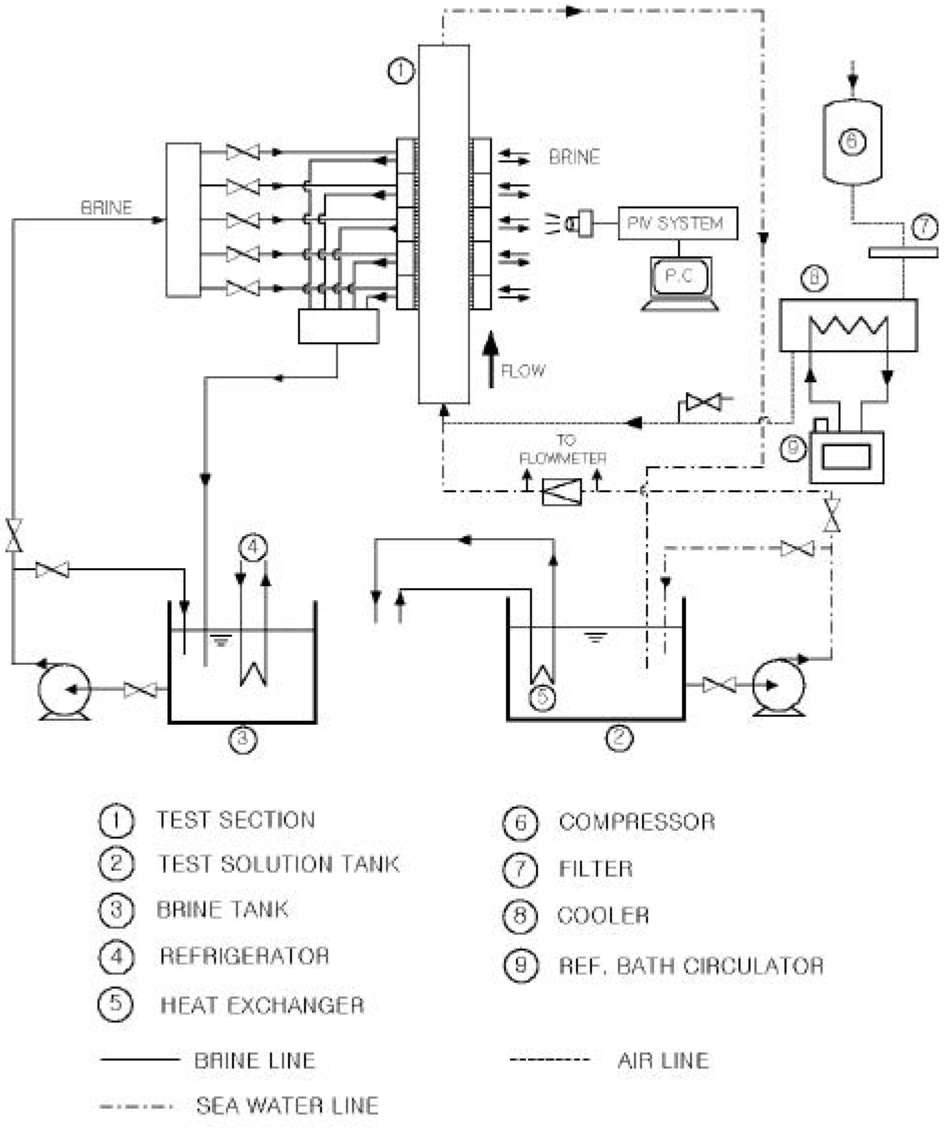
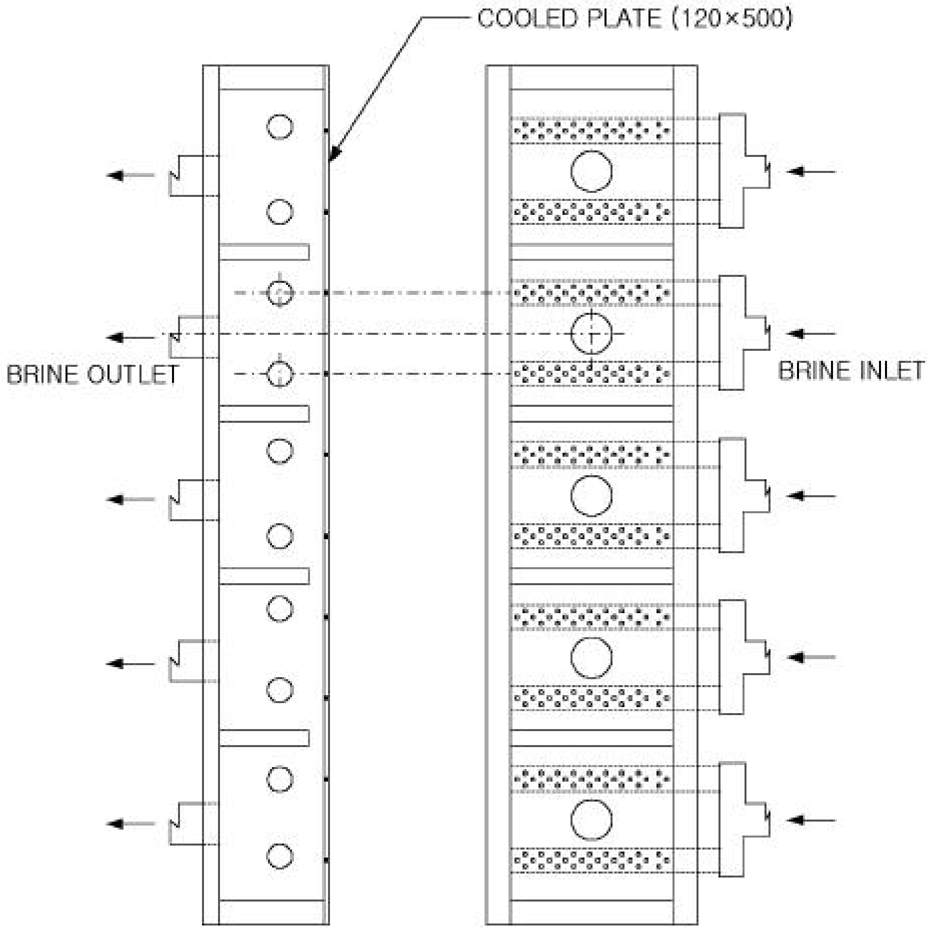


그림 11 실험장치 개요도 (3)

Fig. 4.1 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Front view (b) Side view

Nozzle (ø 22.0) · Thermocouples

Fig. 4.2 Details of test section

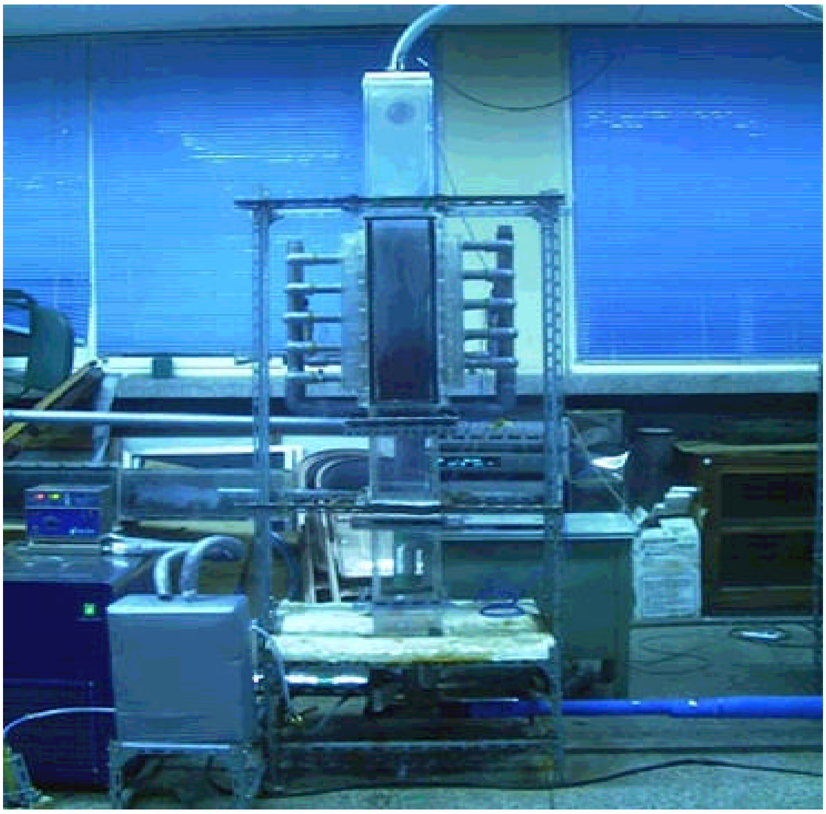


Fig. 4.3 Photograph of experimental apparatus

4.2 수직평행 냉각평판의 열전달 해석

냉각평판의 열전달 해석을 위해서는 먼저 열전도방정식이 결정되어야 한다.

Fig. 4.4와 같은 평판은 두께 L에 비하여 z방향으로 매우 커서 y와 z방향의 모든 기울기는 x 방향의 온도구배에 비해 무시할 정도이다. 또한, 고체내의 온도는 시간에 따라 변하지 않는다. 따라서 $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$이므로, 고체내의 온도 분포 $T(x)$는 x좌표만의 1차원, 정상상태의 열전도방정식에 의해 지배되고 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{1}{k} g(x) = 0 \tag{4.1}$$

본 실험에서는 평판 내부발열이 없는 경우이기 때문에 $g(x) = 0$이므로 식(4.1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = 0 \tag{4.2}$$

이 미분방정식을 두 번 적분하면,

$$\frac{dT(x)}{dx} = C_1$$

$$T(x) = C_1 x + C_2 \tag{4.3}$$

이 식의 경계조건,

$x = 0$ 에서, $T(x) = T_1$

$x = L$ 에서, $T(x) = T_2$

를 적용하면 식(4.3)은 식(4.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2 = T_1$$

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$T(x) = (T_2 - T_1)\frac{x}{L} + T_1 \tag{4.4}$$

이 결과에서 열전도계수가 일정하고 내부 열발생이 없는 평판에서의 1차원 정상상태의 온도분포는 직선적으로 변화한다는 것을 알 수 있다. 평판을 통한 열플럭스 q는 식(4.4)에서 구한 $T(x)$의 해를 x에 대하여 미분하고 Fourier의 법칙을 적용하여 구한다.

$$q = k\frac{T_1 - T_2}{L} \tag{4.5}$$

열유동방향에 수직한 평판면적 A를 통과한 열유동률 Q는 식(4.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = A\,q = A\,k\frac{T_1 - T_2}{L} \tag{4.6}$$

따라서, 열전달율의 계산은 Fig. 4.4와 같이 해수에서 $x = 0$인 평판의 표

면까지 대류에 의한 열유동 Q는 전도에 의해 평판을 통과하고, 다시 $x = L$ 에서 평판표면에서 브라인으로 대류에 의해 전달되므로,

$$Q = A\,h_1(T_{\infty 1} - T_1) = A\,k\frac{(T_1 - T_2)}{L} = A\,h_2(T_2 - T_{\infty 2}) \tag{4.7}$$

식(4.7)은 다음의 식(4.8) 형태로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{1/(A\,h_1)} = \frac{T_1 - T_2}{L/(A\,k)} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{1/(A\,h_2)} \tag{4.8}$$

식(4.8)은 다시 식(4.9)로 정리할 수 있다.

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{1/(A\,h_1) + L/(A\,k) + 1/(A\,h_2)} \tag{4.9}$$

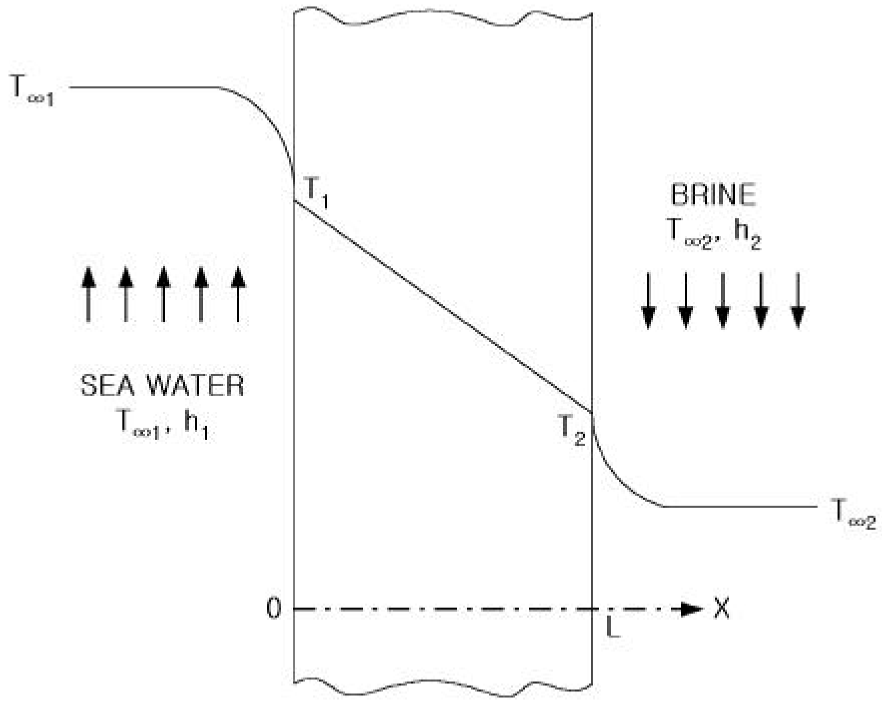


Fig. 4.4 One dimentional heat transfer model in a plane wall

4.3 수직평행 냉각평판 주위에서의 해수동결거동

시험부 하부에서 유입된 작동유체는 냉각면의 하부에서 상부로 상승하면서 평형동결온도이하로 냉각되어 상부면부터 착빙이 되면서 순간적으로 냉각면 전체에 걸쳐 빙이 생성된다. 냉각면의 위치별로 살펴보면 냉각면의 상부면 즉, 흐름의 하류측의 동결량이 흐름의 상류측의 동결량에 비해 동결속도가 빠르고 동결량이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 해수가 냉각면의 하부면에서 상부면으로 흐르면서 냉각되어 냉각면과의 온도차가 작아져서 상부측의 열유속이 감소하여 열경계층(heat boundary layer)이 하부측에 비해 두꺼워지기 때문이다.

실험초기의 빙의 성장은 냉각면과 작동유체 사이의 큰 온도구배로 급격하게 성장하지만 동결량이 증가할수록 빙 자체가 열저항으로 작용해 동결계면으로의 열유속을 방해할 뿐만 아니라 교축작용을 심화시켜 속도의 증대를 가져옴으로써 빙의 성장률은 급격히 저하하면서 정상상태(steady state)에 다다르게 된다.

한편, 초기에 생성된 빙의 조직은 급속한 침상빙의 성장으로 인해 조직이 치밀하지 못하고 희고 밀도가 작은 상태의 조직이며, 빙의 평균염분농도는 비교적 높게 나타났다. 이는 급속한 빙의 성장으로 인해 빙결정에 의해 석출된 NaCl이 빙면밖으로 배제되지 못하고 침상빙의 동결층 내부로 다량의 용질이 함께 몰입하기 때문이다. 그러나, 시간이 경과하면서 빙의 두께에 의한 동결속도의 저하와 유속변화에 따른 강제대류작용의 증대로 인한 침상빙 형성의 억제 및 석출된 용질의 제거작용

의 증대로 말기에 생성된 빙의 염분농도는 초기 생성빙의 농도에 비해 낮은 염분농도를 나타내었다. Fig. 4.5와 Fig 4.6은 각각 동결층의 형상과 염분농도를 냉각면의 위치별로 나타낸 그림으로 빙의 성장률이 빠른 상부면이 중·하부면에 비해 높은 염분농도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 초기 급격한 온도구배에 의해 성장한 빙의 염분농도가 정상상태의 동결층의 염분농도에 비해 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다.

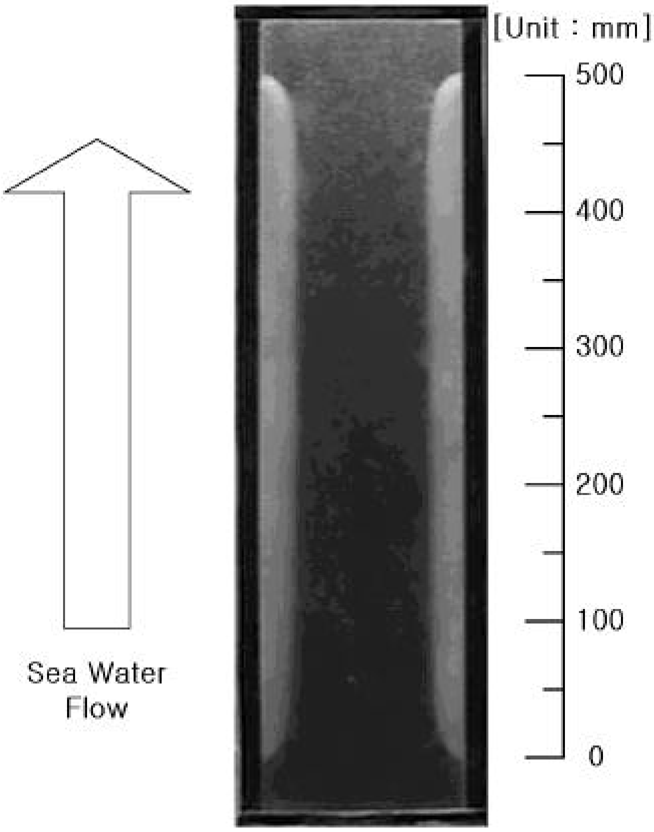


FIg. 4.5 Shape of the frozen layer

; T_w =-20.0℃, Q_{air}=10 ℓ/min, U_i=0.02m/s

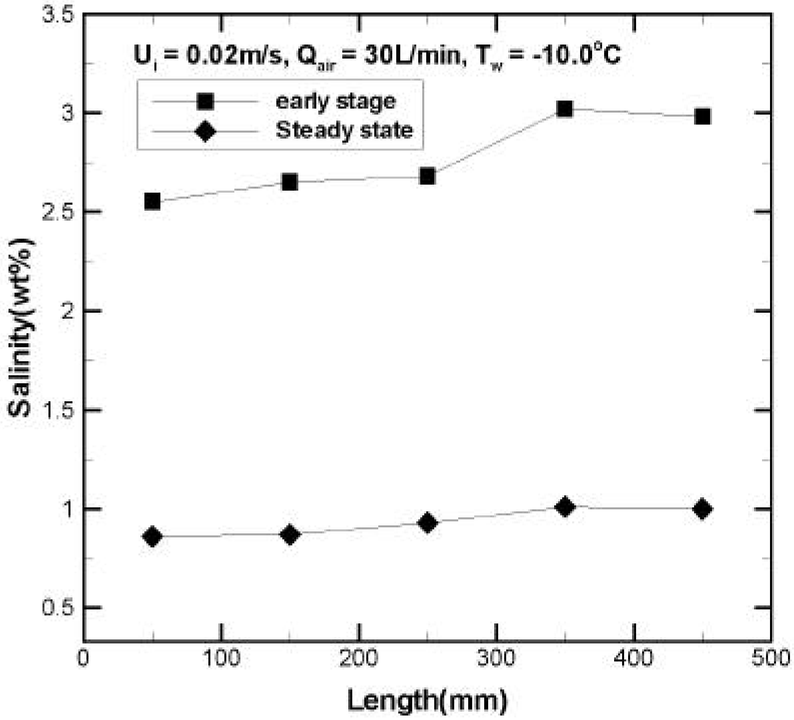


Fig. 4.6 Distribution of salinity in the frozen layer

; T_w =-10.0℃, Q_{air}=30ℓ/min, U_i=0.02m/s

4.4 유속의 영향

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 T_w=-20℃, Q_{air}=10ℓ/min에서 해수의 유속의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험초기에는 냉각면에서 동결계면으로의 큰 온도구배에 따른 열유속의 지배를 받아 급속히 빙이 성장하다가 점차 유속의 영향을 지배적으로 받게 되므로써 빙의 성장속도가 둔화되어 정상상태에 다다름을 확인할 수 있다. 또한, 유속이 빠를수록 대류열전달율이 증대하여 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 4.9 Fig. 4.11은 유속에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 4.12는 Fig 4.7과 동일 조건에서 정상상태에 있어서 유속의 변화에 따른 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 시험부에서의 유속이 빨라짐에 따라 전체 동결량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 빙의 형태를 보면 전체적으로 냉각면 하부에서 상부로 갈수록 동결층의 두껍게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 냉각면의 각각의 부위별로 대류열전달율이 다르기 때문이다.

한편, 빙의 조직은 유속이 낮은 0.02m/s의 경우에 비해 유속이 큰 0.1m/s의 경우에 생성된 빙이 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였는데 이는 유속이 증가함에 따라 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다. 이러한 경향은 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미

친다. 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도의 변화를 유속에 따라 나타내면 Fig. 4.13과 같다. 그림으로부터 유속이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나 전체 생성빙의 염분농도는 Fig. 4.14에 나타낸 바와 같이 유속이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도는 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 유속이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기 큰 열유속에 의해 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 유속의 증가에 따른 용질의 제거효과를 능가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 급격히 상승하는 경향을 보인다.

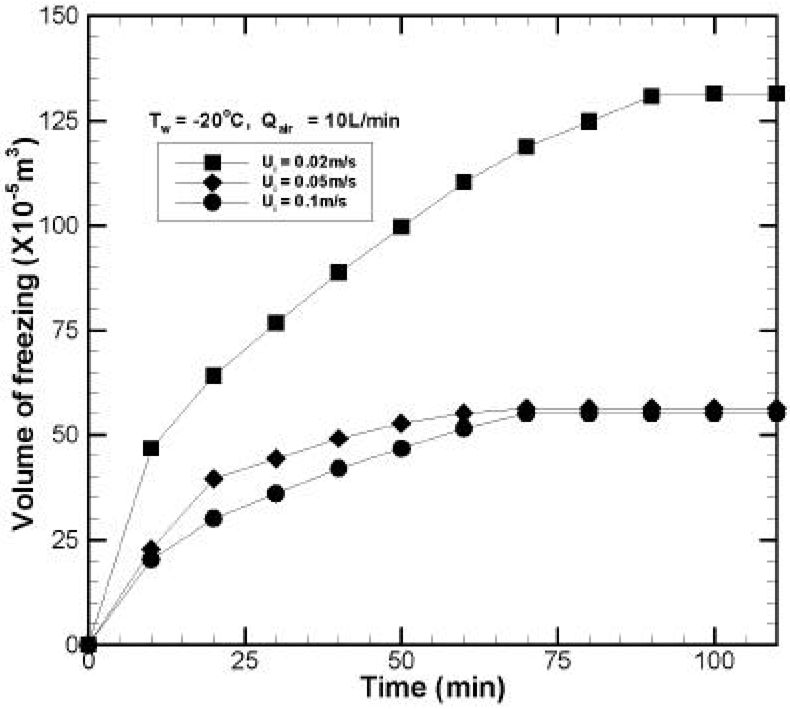


Fig. 4.7 Effect of fluid velocity on volume of freezing

; Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃

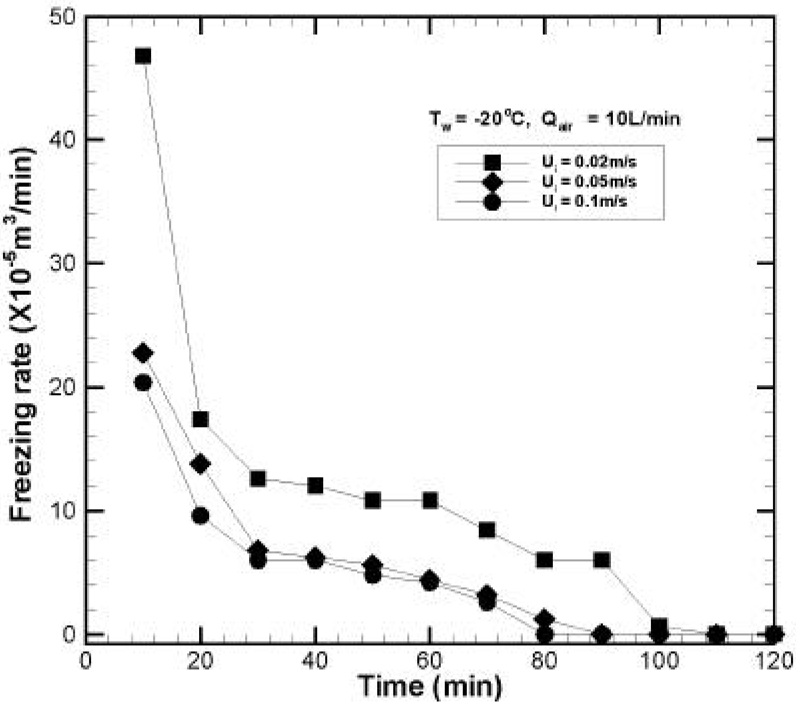
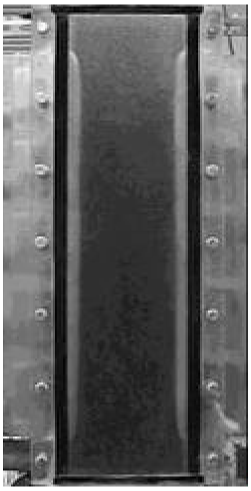
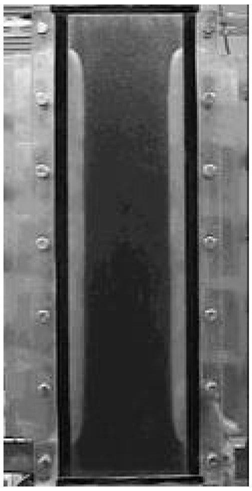


Fig. 4.8 Effect of fluid velocity on freezing rate

; Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃

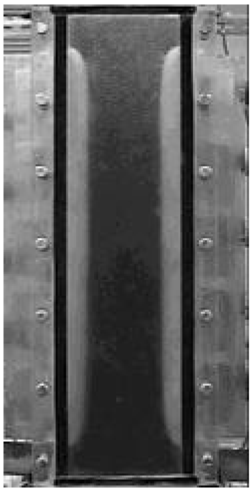


(a) 30min



(b) 60min

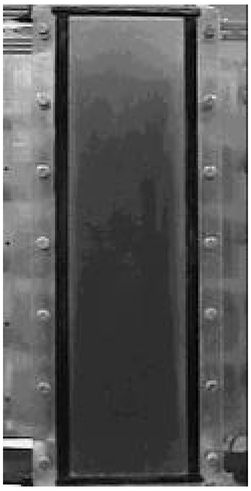
(c) 90min



(d) 120min

Fig. 4.9 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃



(a) 30min

(b) 60min

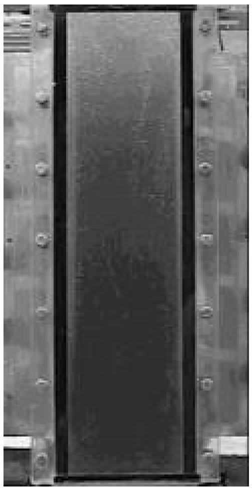
(c) 90min

(d) 120min

Fig. 4.10 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.05m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃

(a) 30min



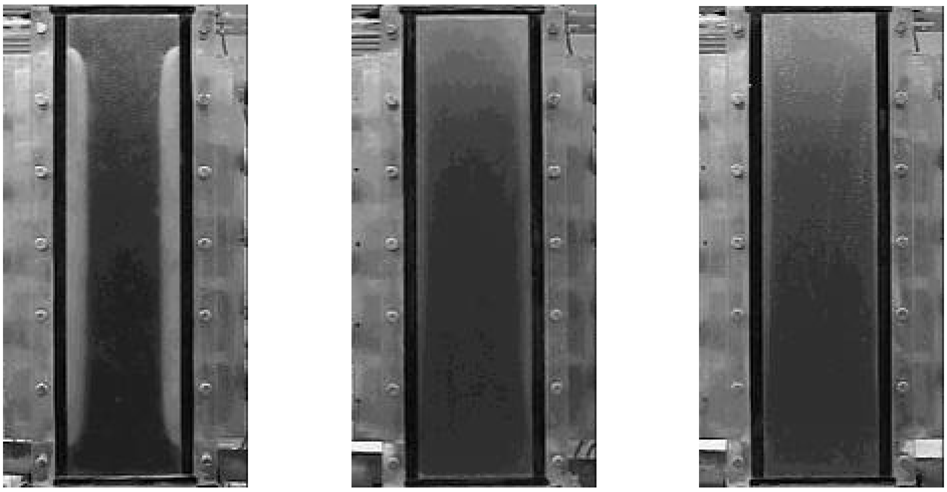
(b) 60min

(c) 90min

(d) 120min

Fig. 4.11 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.1m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃



(a) U_i=0.02m/s (b) U_i=0.05m/s (c) U_i=0.1m/s

Fig. 4.12 Effect of fluid velocity on freezing behavior

; Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃

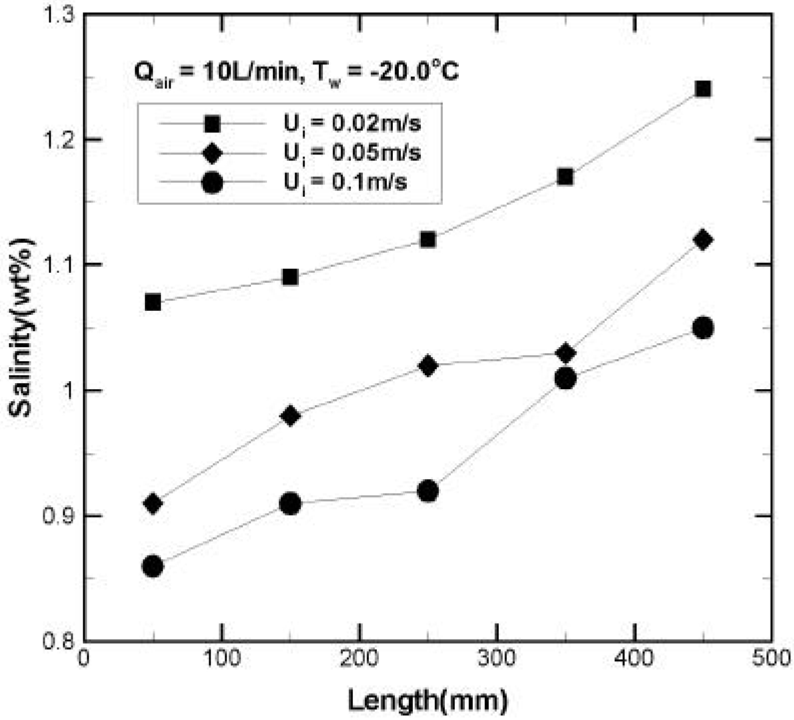


Fig. 4.13 Salinity of external frozen layer in the steady state

; Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃

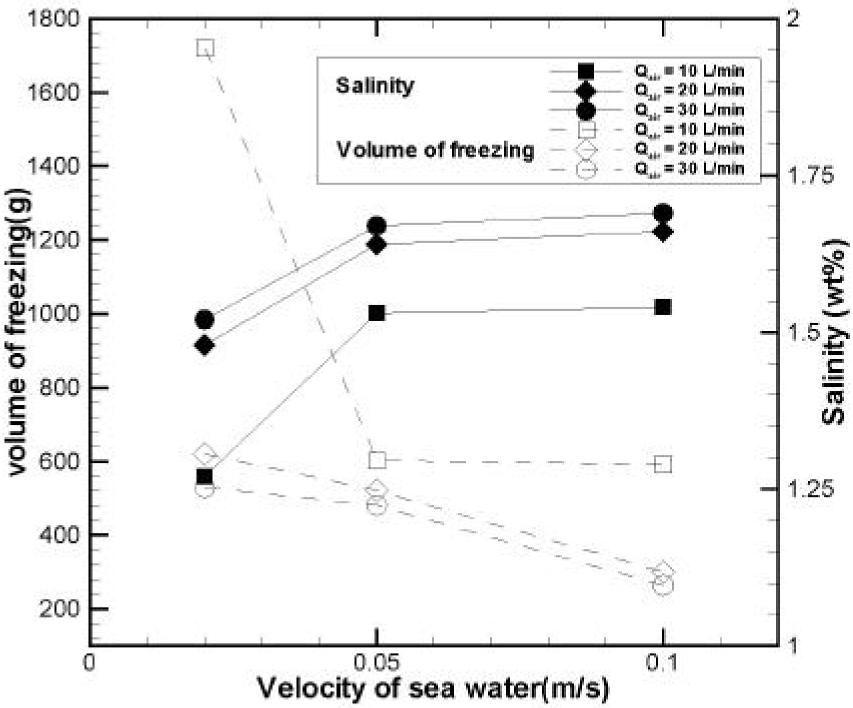


Fig. 4.14 Mean salt concentration of frozen layer

; T_w =-20℃

4.5 공기 분사량의 영향

Fig. 4.15와 Fig. 4.16은 T_w=-20℃, U_i=0.02m/s에서 공기 분사량의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험개시 후 약 30분까지 급격한 빙의 성장을 보이다가 그 후 점차 동결량이 감소하여 정상상태에 이르는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 또한, 공기 분사량이 증가할수록 빙이 지속적으로 성장을 하지 못하고 빨리 정상상태에 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 4.17 Fig. 4.19는 공기 분사량에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 4.20은 Fig 4.15와 동일 조건에서 정상상태의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가함에 따라 전체 동결량이 현저하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 동결계면에 가해지는 기포의 충격력이 증가하고, 기포류가 동결계면과 수용액의 접촉을 방해하는 절연제 역할을 하여 동결계면에서 해수로의 열전달을 방해하기 때문으로 생각된다.

한편, 빙의 조직은 공기 분사량이 작은 10ℓ/min의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 공기 분사량이 큰 30ℓ/min의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였다. 이는 공기 분사량이 증가함에 따라 기포의 충격력에 의해 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨수용액의 제거효과가 증대하여 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

이러한 경향은 전술한 유속의 영향에서와 마찬가지로 생성빙의 염분농도에도 큰 영향을 미친다. Fig. 4.21은 정상상태에 있어서 공기 분사량의 변화에 따른 동결층의 염분농도의 변화를 나타내었다. 그림으로부터 공기 분사량이 증가할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있다.

그러나 전체 생성빙의 염분농도는 전술한 유속의 영향과 비슷한 경향을 보인다. Fig. 4.22는 공기 분사량에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 공기 분사량이 증가할수록 생성빙의 평균염분농도 또한 증가하는 경향을 보인다. 이는 공기 분사량이 증가할수록 빙의 성장률이 감소함에 따라 전체 동결량이 작아져서 실험초기 급격히 성장한 염분농도가 높은 빙이 전체 생성빙에 대해 차지하는 비율이 증가함으로써 평균염분농도에 미치는 영향이 공기 분사량에 의한 충격력의 증가에 따른 용질의 제거효과를 능가하기 때문에 생성빙의 평균염분농도는 상승하는 경향을 보인다.

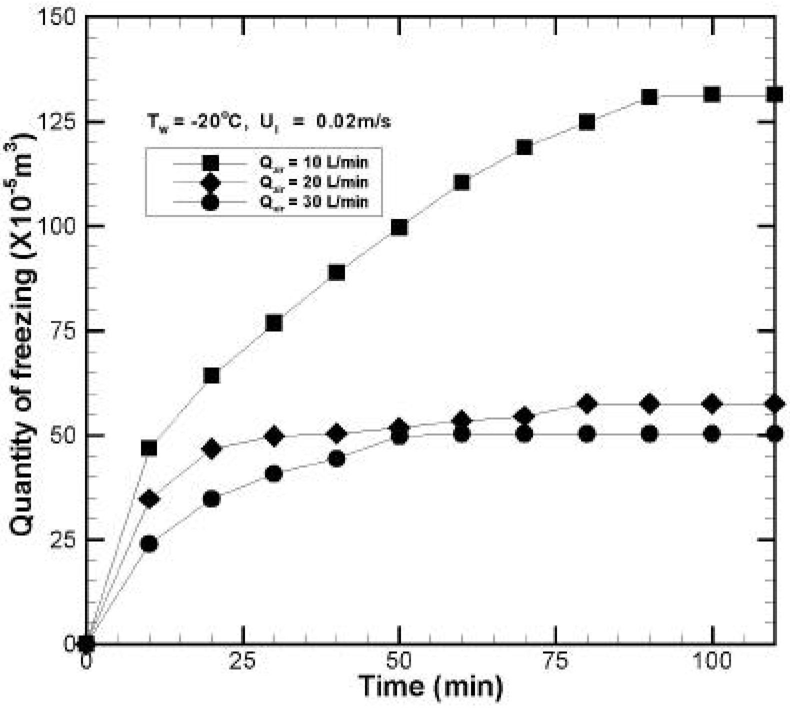


Fig. 4.15 Effect of air-bubble flow rate on volume of freezing ; T_w=-20℃, U_i=0.02m/s

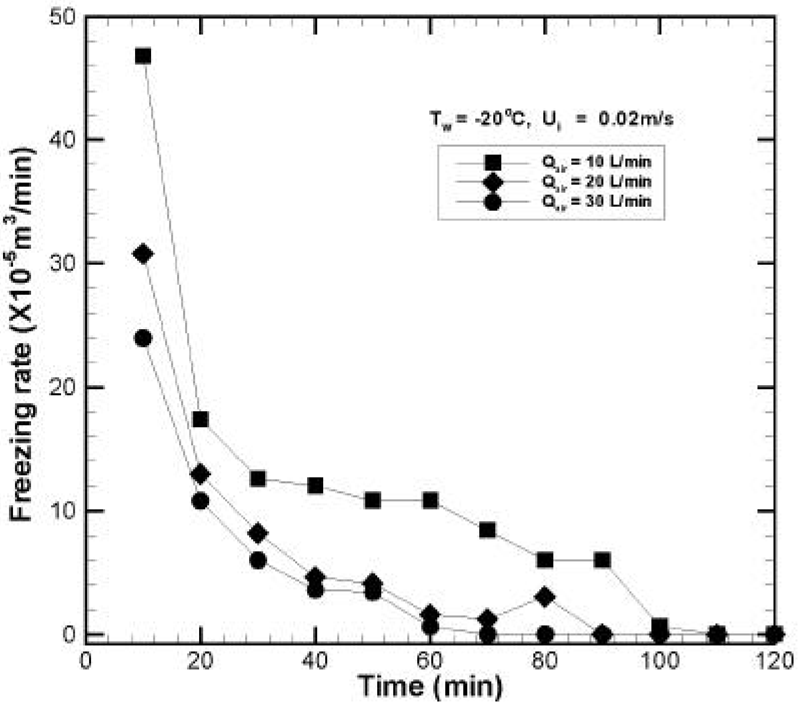
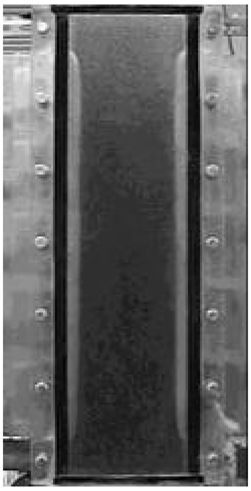
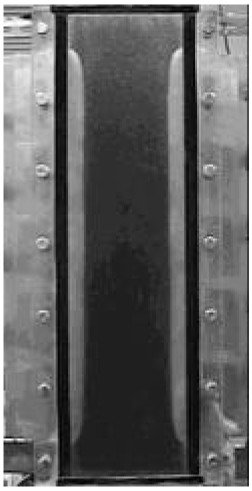


Fig. 4.16 Effect of air-bubble flow rate on volume of freezing

; T_w=-20℃, U_i=0.02m/s

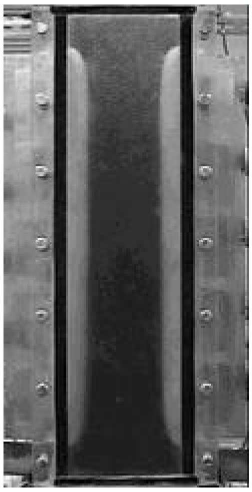


(a) 30min



(b) 60min

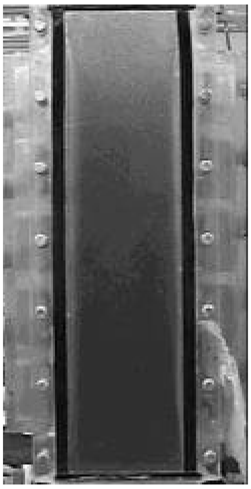
(c) 90min



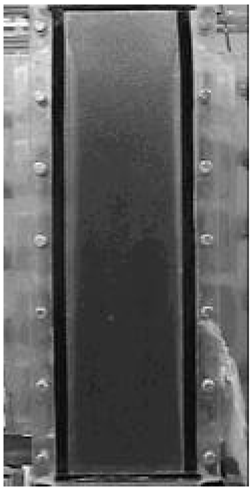
(d) 120min

Fig. 4.17 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10 ℓ/min, T_w=-20℃



(a) 30min



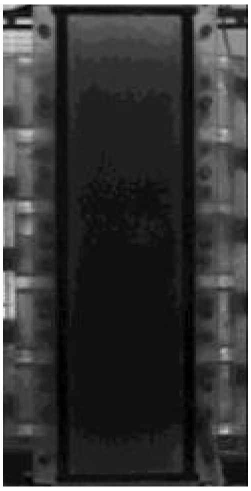
(b) 60min

(c) 90min

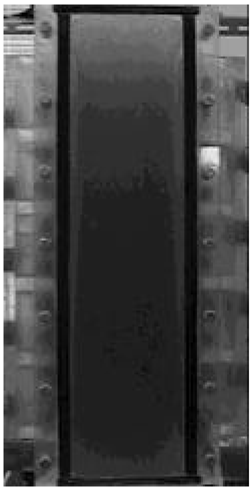
(d) 120min

Fig. 4.18 Freezing behavior of sea water

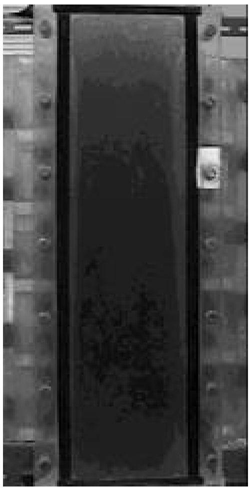
; U_i=0.02m/s, Q_{air}=20ℓ/min, T_w=-20℃



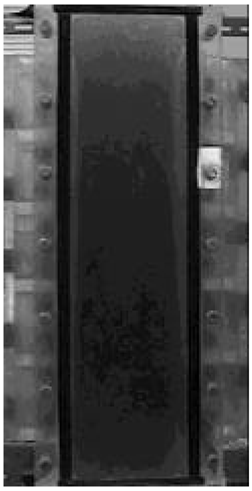
(a) 30min



(b) 60min



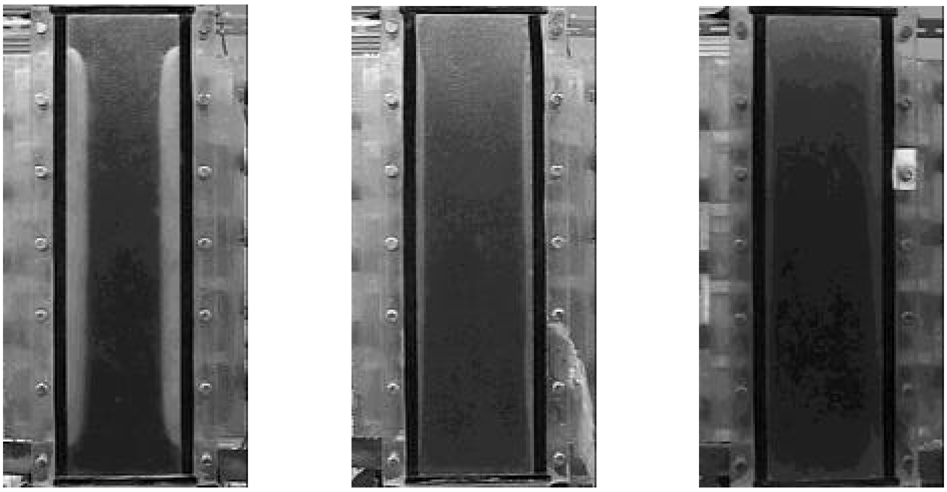
(c) 90min



(d) 120min

Fig. 4.19 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=30ℓ/min, T_w=-20℃



(a) Q_{air}=10 ℓ/min (b) Q_{air}=20 ℓ/min (c) Q_{air}=30 ℓ/min

Fig. 4.20 Effect of air-bubble flow rate on freezing behavior ; T_w=-20℃, U_i=0.02m/s

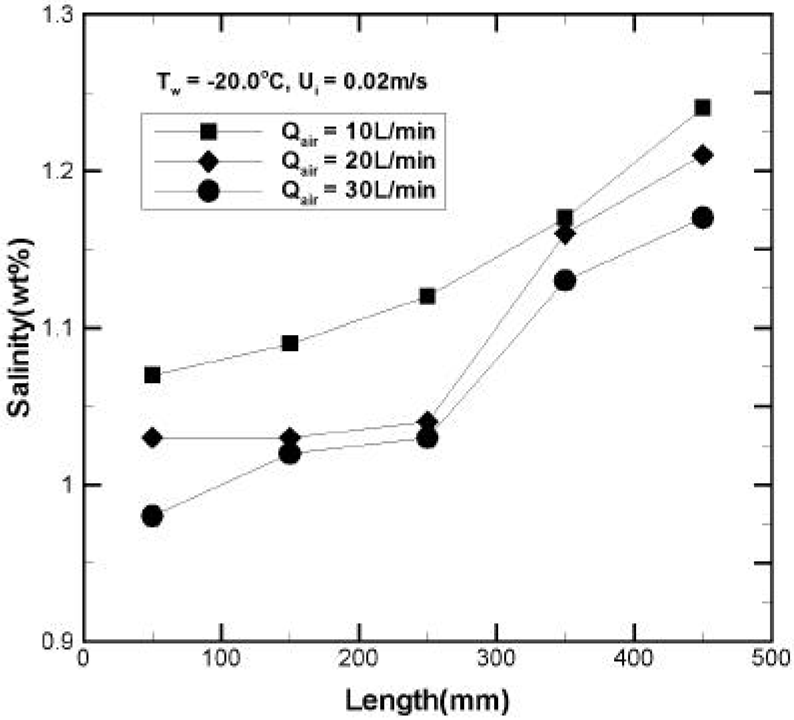


Fig. 4.21 Salinity of external frozen layer in the steady state ; T_w =-20℃, U_i=0.02m/s

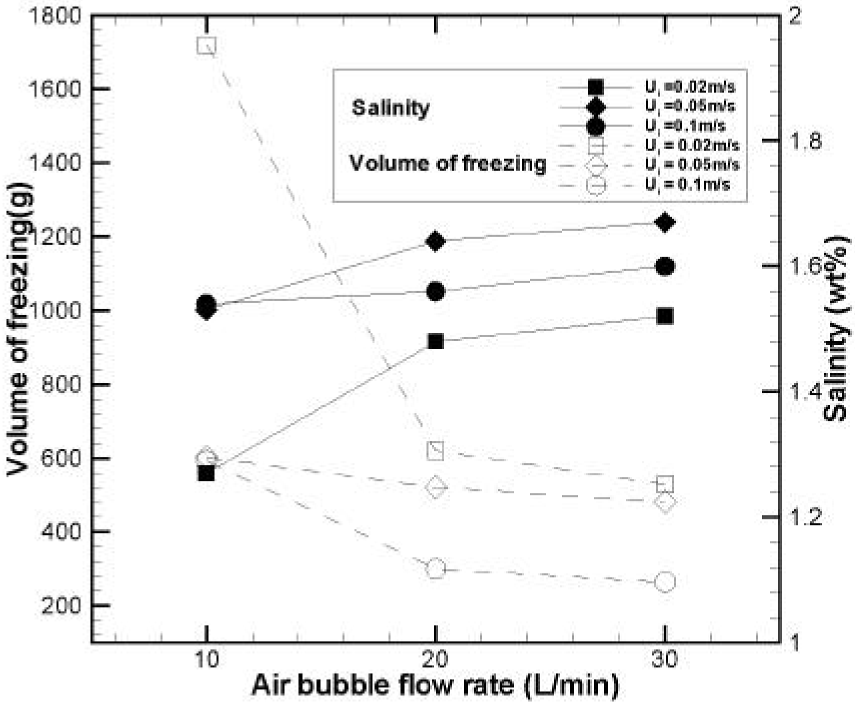


Fig. 4.22 Mean salt concentration of frozen layer

; T_w =-20℃

4.6 냉각면 온도의 영향

Fig. 4.23과 Fig. 4.24는 Q_{air}=10ℓ/min, U_i=0.02m/s에서 냉각면 온도의 변화에 따른 동결량과 동결률의 변화를 시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 빙의 성장은 실험개시 후 급격한 성장을 보이다가 그 후 점차 동결량이 감소하여 정상상태에 이르는 경향을 보인다. 또한, 냉각면 온도가 T_w=-20℃일때는 빙의 성장이 실험개시 120분까지 지속적으로 이루어지나 냉각면 온도 T_w=-15℃ 이상의 경우에는 초기 급격한 상승후에 동결량이 현저히 줄어듬을 알 수 있다. Fig. 4.25 Fig. 4.27은 냉각면 온도에 따른 해수의 동결거동을 가시화한 사진이다.

Fig. 4.28은 Fig 4.23과 동일 조건에서 정상상태에 있어서의 해수의 동결량의 변화를 가시화한 사진이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승함에 따라 전체 동결량이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 냉각면 온도가 상승할수록 즉, 냉각면과 동결계면 사이의 열낙차가 감소할수록 냉각면에서 동결계면으로의 열유속이 감소하기 때문이다.

한편, 빙의 조직은 냉각면 온도가 낮은 T_w=-20℃의 경우는 다소 강도가 약한 상태의 빙질을 보이는 반면 냉각면 온도가 높은 T_w=-10℃의 경우에는 빙질이 상대적으로 훨씬 조직이 치밀하고 단단한 투명빙을 생성하였다. 이는 냉각면 온도가 상승함에 따라 열유속이 작아져 생성된 침상빙이 지속적으로 성장하지 못하고 다시 융해되어 빙의 성장 속도가

느려지기 때문에 동결로 인해 석출된 고농도의 염화나트륨이 침상빙 사이에 몰입되지 않고 빙면 밖으로 배제되어 동결층내에 고액공존층이 감소하기 때문이다.

Fig. 4.29는 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도를 냉각면 온도의 변화에 따라 나타낸 그림이다. 그림으로부터 냉각면 온도가 상승할수록 정상상태에 도달한 동결층의 염분농도가 저감됨을 알 수 있는데, 그 이유는 냉각면 온도가 상승할수록 빙성장률이 둔화되어 동결에 의해 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제될 수 있는 시간이 증대되기 때문이다.

Fig. 4.30은 냉각면 온도에 따른 평균염분농도의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 냉각면 온도가 상승할수록 동결량은 급격히 감소한다. 생성빙의 평균염분농도는 -20℃에서 -15℃로 상승할 때는 전술한 공기 분사량의 영향에서와 같은 이유로 염도가 상승하는 경향을 나타낸다. 그러나, -10℃로 온도가 상승하면 냉각면에서 동결계면으로의 열유속에 작아져 실험초기부터 빙의 동결속도가 저하함으로써 석출된 고농도의 염화나트륨이 동결계면 밖으로 배제되는 효과가 증대되어 동결층 전체의 평균염분농도가 저하함을 알 수 있다.

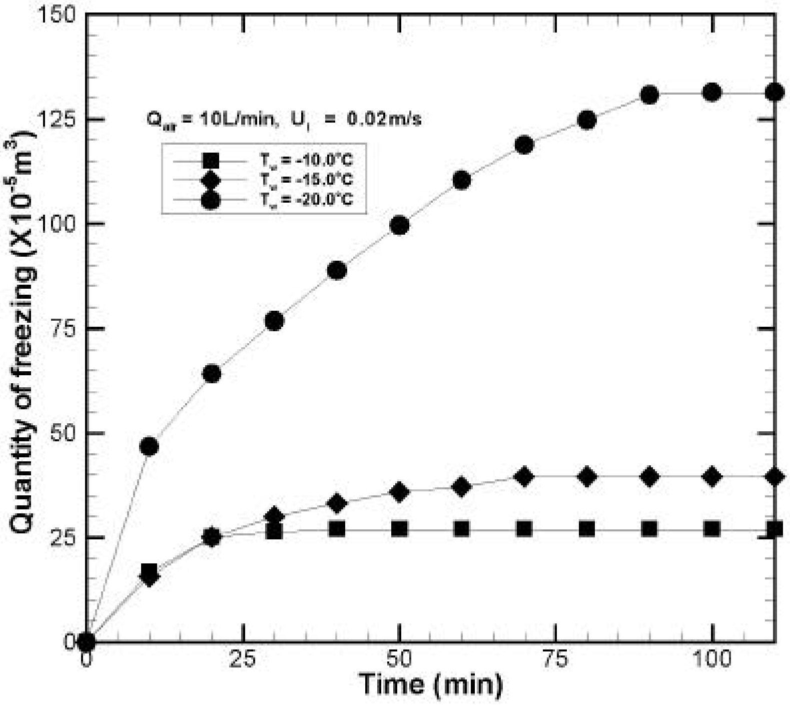


Fig. 4.23 Effect of cooled plate temperature on volume of freezing ; Q_{air}=10ℓ/min U_i=0.02m/s

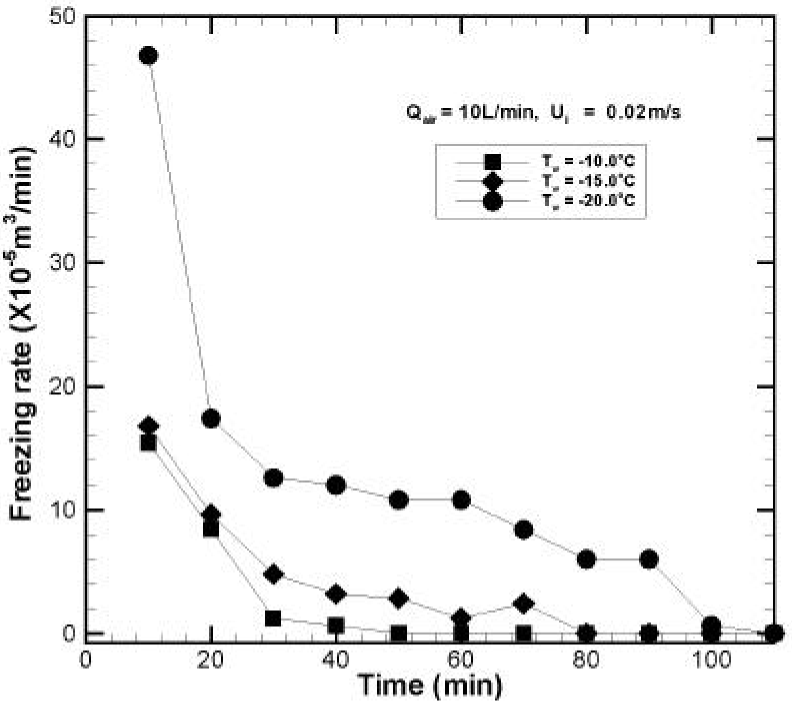
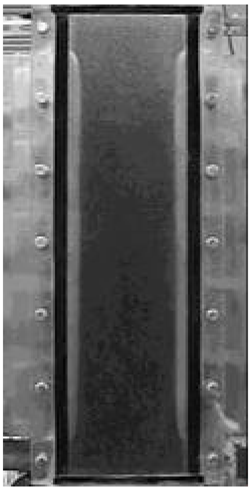


Fig. 4.24 Effect of cooled plate temperature on freezing rate

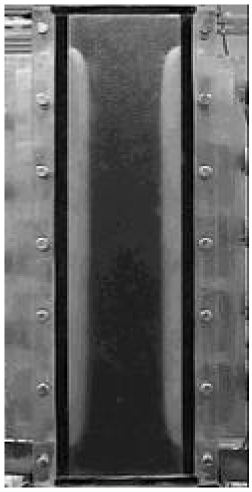
; Q_{air}=10 ℓ/min U_i=0.02m/s



(a) 30min

(b) 60min

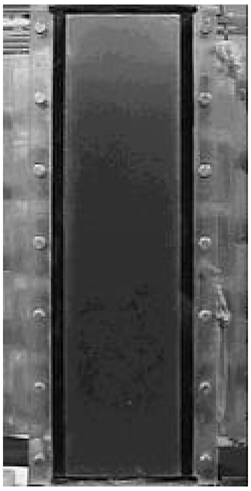
(c) 90min



(d) 120min

Fig. 4.25 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-20℃



(a) 30min

(b) 60min

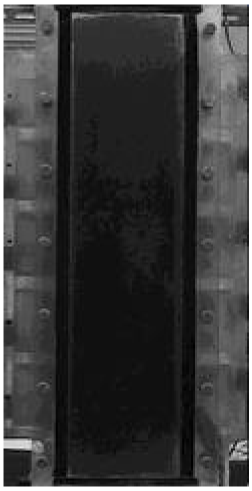
(c) 90min

(d) 120min

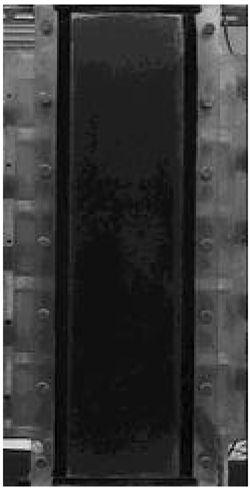
Fig. 4.26 Freezing behavior of sea water

; $U_i=0.02m/s$, $Q_{air}=10\ \ell/min$, $T_w=-15$℃

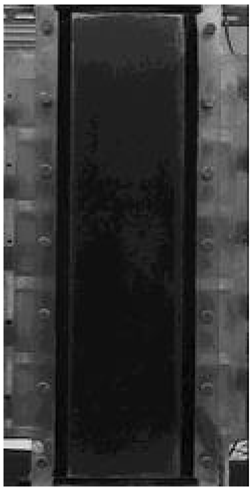
(a) 30min



(b) 60min



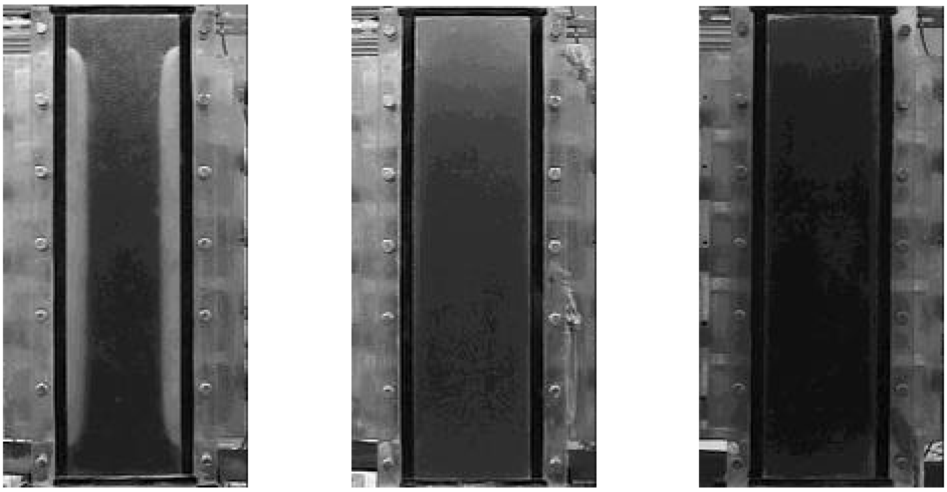
(c) 90min



(d) 120min

Fig. 4.27 Freezing behavior of sea water

; U_i=0.02m/s, Q_{air}=10ℓ/min, T_w=-10℃



(a) T_w =- 20℃ (b) T_w =- 15℃ (c) T_w =- 10℃

Fig. 4.28 Effect of cooled plate temperature on freezing behavior ; Q_{air}=10ℓ/min, U_i=0.02m/s

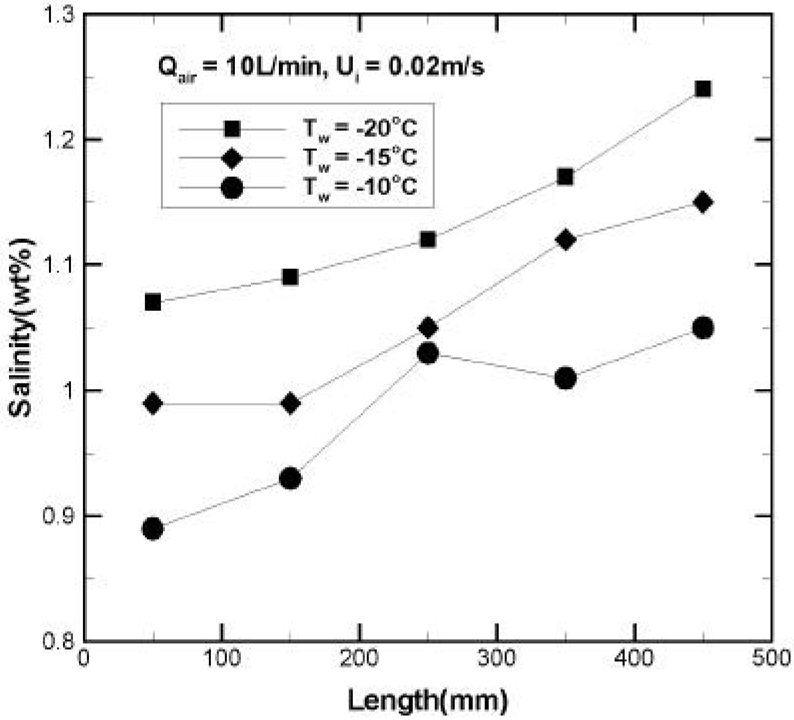


Fig. 4.29 Salinity of external frozen layer in the steady state
; Q_{air}=10ℓ/min, U_i=0.02m/s

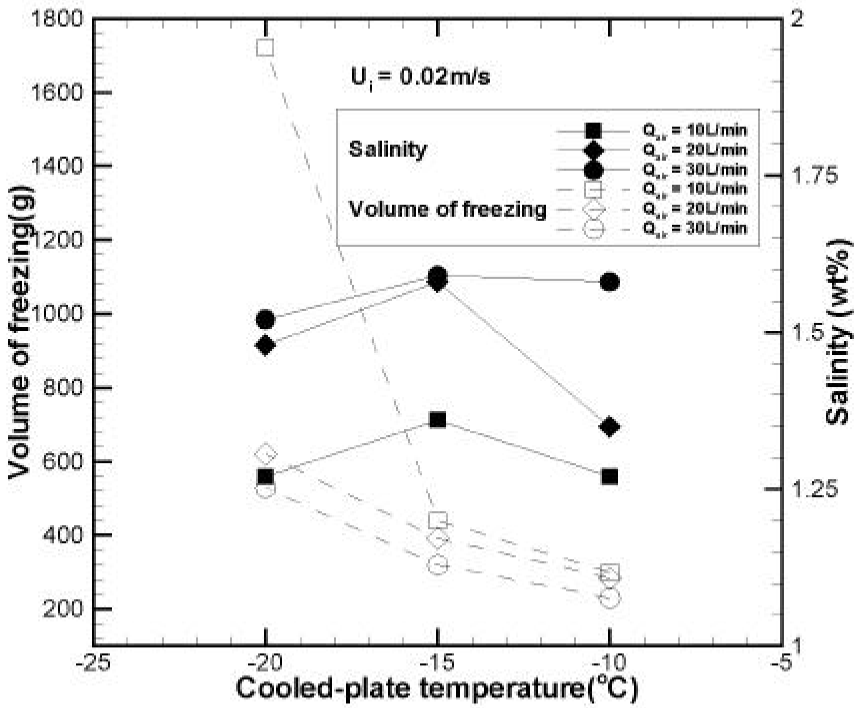


Fig. 4.30 Mean salt concentration of frozen layer

; Q_{air}=10ℓ/min, U_i=0.02m/s

4.7 무차원 정리

본 실험의 연구결과로부터 수직평행평판에서의 동결량은 시간의 경과, 유속의 감소, 공기 분사량의 감소 및 냉각면 온도의 저하와 함께 증가함을 알 수 있다. 본 절에서는 실험에서 얻어진 동결량에 대한 결과를 무차원화하여 정리하였다. 본 실험범위내에서 동결량에 영향을 미치는 인자들을 정리하면 무차원 동결량 R_f는 (4.10)식으로 정리가 가능하다.

$$R_f = f(\theta_w, Re, X) \tag{4.10}$$

여기서, R_f (무차원 동결량) $= \dfrac{V_f}{H_o}$,

θ_w(무차원 냉각면 온도) $= \dfrac{(T_f - T_w)}{(T_o - T_f)}$,

Re (레이놀즈수) $= \dfrac{U_i \cdot D_h}{\nu}$,

X (무차원 공기유량) $= \dfrac{W_{air}}{W_{air} + W_l}$

이다. 최소자승법을 이용하여 θ_w, Re, X의 함수로서 무차원 동결량 R_f를 정리하면 Fig. 4.30으로 나타낼 수 있다. 따라서 그림으로부터 무차원 동결량은 약 ±20%의 오차한계 범위 내에서 (4.11)식으로 정리될 수 있다.

$$R_f = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{-0.32} \cdot X^{-0.52} \tag{4.11}$$

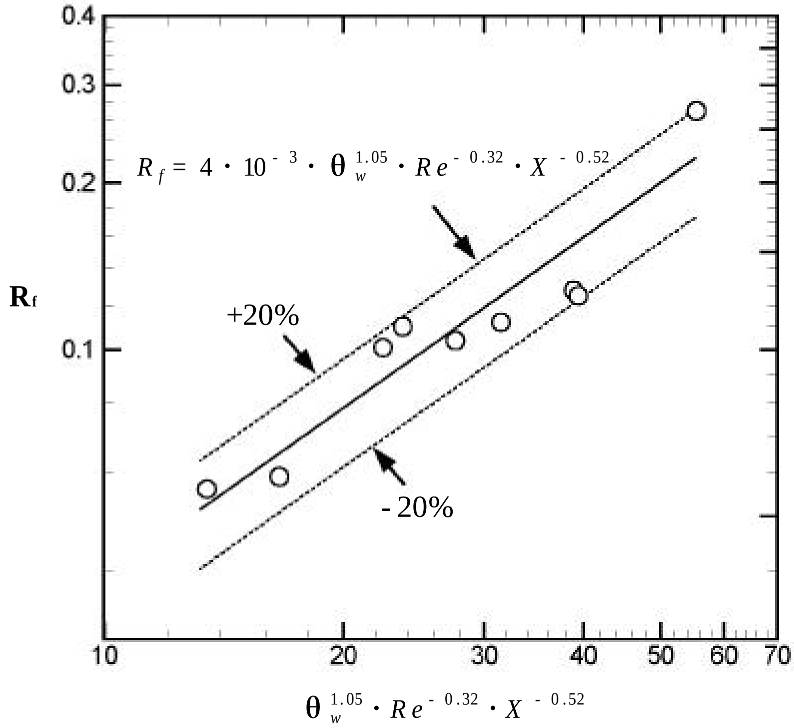


Fig. 4.30 Dimensionless frozen quantity

4.8 결 론

본 장에서는 기포류를 동반한 유동장에서 수직평행 냉각평판의 해수 동결거동 메카니즘과 해수의 유속, 공기 분사량 및 냉각면 온도가 해수의 동결량 및 염분농도에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과, 본 실험의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험초기의 동결층의 동결속도는 냉각면과 동결계면 사이의 큰 열유속에 의해 대단히 빠르며, 생성된 빙의 염분농도는 빠른 동결속도로 인한 용질의 몰입으로 높은 염분농도를 가진다.

(2) 실험초기 급속한 성장을 보이는 초기 생성빙을 제외한 정상상태의 동결층의 표면부위의 염분농도는 해수의 유속이 클수록, 공기분사량이 증가할수록, 냉각면 온도가 높을수록 감소한다.

(3) 빙의 동결율은 해수의 유속이 작을수록, 공기 분사량이 감소할수록, 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.

(4) 전체 동결층의 평균염분농도는 해수의 유속이 증가할수록, 공기분사량이 증가할수록 증가한다.

(5) 냉각면의 위치에 따른 동결층의 동결율과 염분농도는 수직평행 냉각평판의 상부(흐름의 하류)로 갈수록 높은 동결율과 염분농도를 나타낸다.

(6) 본 실험 범위내에서 해수의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_f = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{-0.32} \cdot X^{-0.52}$$

제 5 장 총 결 론

본 연구에서는 LNG 폐냉열을 이용한 해수동결 담수화장치의 설계 및 개발에 필요한 해수동결거동에 관한 정성적, 정량적 기초자료를 확보하기위해 기포류를 동반한 유동장에서의 해수동결거동의 메카니즘과 해수의 유속, 공기 분사량 및 냉각면 온도가 해수의 동결량 및 염분농도에 미치는 영향을 냉각원관과 수직평행냉각평판에서 실험적으로 검토한 결과, 본 실험의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험초기의 동결층의 동결속도는 냉각면과 동결계면 사이의 큰 열유속에 의해 대단히 빠르며, 생성된 빙의 염분농도는 빠른 동결속도로 인한 용질의 몰입으로 높은 염분농도를 가진다.

(2) 실험초기 급속한 성장을 보이는 초기 생성빙을 제외한 정상상태의 동결층의 표면부위의 염분농도는 해수의 유속이 클수록, 공기분사량이 증가할수록, 냉각면 온도가 높을수록 감소한다.

(3) 빙의 동결율은 해수의 유속이 작을수록, 공기 분사량이 감소할수록, 냉각면 온도가 낮을수록 증가한다.

(4) 전체 동결층의 평균염분농도는 해수의 유속이 증가할수록, 공기분사량이 증가할수록 증가한다.

(5) 냉각면의 위치에 따른 동결층의 염분농도는 냉각면의 상부(흐름의 하류)로 갈수록 높은 염분농도를 나타낸다.

(6) **냉각면의 위치에 따른 동결량은 냉각면의 상부로 갈수록 증가한다.**

(7) **본 실험 범위내에서 냉각원관에서의 해수의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.**

$$R_f = 4.27 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.75} \cdot Re^{-0.38} \cdot X^{-0.42}$$

(8) **본 실험 범위내에서 수직평행 냉각평판에서의 해수의 무차원 동결량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.**

$$R_f = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_w^{1.05} \cdot Re^{-0.32} \cdot X^{-0.52}$$

참 고 문 헌

(1) Peter H. Gleick, “Water in Crisis”, Oxford University Press, (1993).

(2) 김병덕, 김재윤, “물부족 현황과 국내 담수화 기술개발 현황”, 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp.105 109, (1996).

(3) 김명준, 김명환, 박형진, “구형용기의 하부면 냉각에 의한 해수 동결거동의 기초적 연구”, 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집, 제 1권, pp.347 353, (1997).

(4) 박종덕, 김명준, 김명환, “원관내의 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국박용기관학회 춘계학술 강연회, pp.M-1 M-7, (1998).

(5) 최부홍, 김명준, 김명환, “구형용기의 상부면냉각에 의한 해수 동결거동의 실험적 연구”, 한국박용기관학회 추계학술 강연회, pp.23 29, (1998).

(6) 김성태, “냉각원관 주위의 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국해양대학교 석사학위논문, (2000).

(7) 조이제, “유동장을 동반한 해수동결거동에 관한 실험적 연구”, 한국해양대학교 석사학위논문, (2000).

(8) Carey, V.P. and Gebhart, B., “Transport Near a Vertical Ice Surface Melting In Saline Water-Experiments at Low Salinities”, J. Fluid Mech., Vol. 117, pp.403 423, (1982).

(9) Johnson, R.S., and Mollendorf, J.C "Transport From a Vertical Ice Surface Melting In Saline Water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 27, No 10, pp.1928 1932, (1982).

(10) Beckermann, C., "Melting and Solidification of Binary Mixture With Double-Diffusive Convection in the Melt" Ph.D. Thesis, Purdue University, (1987).

(11) Beckermann, C., and Viskanta, R., "Double-Diffusive Convection During Dendritic Solidification of a Binary Mixture", Physico Chemical Hydrodynamics, Vol. 10, No. 2, pp.195 213, (1988).

(12) R.W. Powell, "Advance in Physics", Vol. 7, pp.276, (1958).

(13) J.K. Landauer & H. Plumb, SIPRE Research Paper, Vol. 16, (1956).

(14) Gilpin, R.R., "The Effect of Cooling Rate on the Formation of Dendritic Ice in a Pipe With No Main Flow", Trans. ASME. J. Heat Transfer, 99, pp.419 424, (1977).

(15) Gilpin, R.R., "The Effect of Dendritic Ice Formation in Water Pipe", Int. J. Heat Mass Transfer, 20, pp.693 699, (1977).

(16) Gilpin, R.R., "Cooling of a Horizontal Cylinder of Water Through its Maximum Density Point at 4℃", Int. J. Heat Mass Transfer, 18, pp.1307 1315, (1975).

(17) Cheng, K.C., Takeuchi, M., "Transient Natural Convection of

Water in a Horizontal Pipe with Constant Cooling Rate Thought 4℃" J. Heat Transfer, 98, pp.581 587, 1976

(18) 福迫尙一郎, "成層をなす圓管內流體の自然對流熱傳達", 日本機械學會論文集, 54, 499, pp.641, (1989).

(19) 平田哲夫, "圓管內流れの凍結閉そくに關する硏究", 日本機械學會論文集(B編) 51券 464号, pp.1243 1250, (1985).

(20) 稻葉英男, 福田武幸, 齊藤図, 戶倉郁夫, "圓筒內流動水の凍結擧動に關する硏究", 日本冷凍協會論文集, Vol.4, No.2, pp.71 79, (1987).

(21) T. Hirata, R.R. Gilpin & K.C. Cheng, Int. J. Heat Mass Transfer., 22, pp.1435, (1979).

(22) R.R. Gilpin, T. Hirata & K.C. Cheng, J. Fluid Mech., 99, pp.6199, (1980).

(23) Terwilliger, P. and Dizio, S.F., "Salt rejection phenomena in the freezing of saline solutions in cells", Chemical Engineering Science, 25, pp.1331 1349, (1970).

(24) 林勇二郎・加 信治, "溶液凝固硏究(第一報, 凝固の過程と移動速度論)", 第17回日本伝熱講シンポジウム演論文集, pp.523 525(昭55)

(25) 福迫尙一郎, 稻葉英男, "低溫環境下の伝熱現象とその応用", 養賢堂, pp.320 335, (1996)

(26) 이영호, 최장운, PIV에 의한 유동장의 계측, 대한조선학회지, 제14권, 제2호, pp.43, (1994).

(27) 최장운, 이영호, PIV에서의 계조치상호상관법의 개발, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 제2권, pp.396 400, (1995).
(28) 이영호, 최장운, PIV의 분류 및 원리, 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp.1146-1162.

맺 음 말

모두에게 설레임으로 다가왔던 2000년 올 한해는 저에게 있어서 너무나 소중하고 값진 시간들이었습니다. 돌이켜 보면 힘들고 괴로운 순간도 있었지만, 그 고통의 무게만큼 더욱 성숙해진 느낌입니다.

먼저, 본 논문이 완성되기까지 학문의 길을 열어주시고, 길을 잃고 헤매고 있을때에도 항상 세심한 배려와 사랑으로 감싸주신 오 철 지도교수님께 가슴깊이 감사드립니다. 또한, 논문이 완성되기까지 많은 조언과 가르침을 주시고 세심한 논문심사까지 해주신 김명환 교수님, 이영호 교수님께 진심으로 감사드리며, 항상 학문적인 자극을 주신 윤석훈 교수님, 김경근 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

그리고, 바쁜 교육일정에도 불구하고 많은 격려와 배려를 아끼지 않으신 김종도 교수님을 비롯한 모든 한나라호 교수님들 및 사관님들께 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 본 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 실험실의 박종덕님, 조이제님, 김성태님, 박상균님과 열공학실험실의 이정혜님, 박영승님께도 감사드립니다.

끝으로 지금까지 많은 어려움속에서도 든든한 후원자가 되어 주었던 누나, 큰 형, 작은 형 내외분들과 막내동생 수미, 그리고 오늘이 있기까지 헌신적인 희생과 사랑으로 보살펴주신 나의 사랑하는 어머니, 아버지께 오늘의 모든 기쁨을 드립니다.